



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PARAMETRICKÉ ZKOUŠKY PLAZMOVÉHO SVAŘOVÁNÍ KOŘENESVARU

PARAMETRIC TESTING PLASMA WELDING ON THE ROOT OF WELD LINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. DAVID ZÁŠKODA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAROSLAV KUBÍČEK

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. David Zášková

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Parametrické zkoušky plazmové svařování kořene svaru

v anglickém jazyce:

Parametric testing plasma welding on the root of weld

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování plazmovým paprskem je charakteristické velmi dobrým protavením kořene svaru. V novém postupu svařování žárupevných materiálů velkých tloušťek je proto navrženo svařování kořene v kombinaci se svařováním pod tavidlem.

Cíle diplomové práce:

1. Rozbor současného stavu v daném oboru
2. Literární studie
3. Návrh experimentu a zkoušek
4. Provedení experimentu
5. Diskuze výsledků experimentu
6. Technicko-ekonomické hodnocení

Seznam odborné literatury:

- 1.DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
- 2.BLAŠČÍK, F. a kol. Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarovania, 1vyd. ALFA Bratislava 1988, 830s. ISBN 063-563-87
- 3.KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
5. KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5
6. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Kubíček

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

ZÁŠKODA David: Parametrické zkoušky plazmového svařování kořene svaru

Předmětem této diplomové práce je posoudit vhodnost nového postupu svařování kořenů svarových spojů rotorů parní turbíny plazmovým paprskem. Nově navržená metoda využívá kombinace svařování kořene svaru plazmou s metodou svařování pod tavidlem, ovšem svařování pod tavidlem není předmětem této práce.

V rámci provedených zkoušek byly ověřovány možnosti svařování kořene svaru plazmovým paprskem – metodou klíčové dírky bez přídavného materiálu. Cílem bylo nalézt optimální svařovací parametry a dosáhnout požadované jakosti svaru, zejména s ohledem na jeho geometrické provedení. Rotor turbíny souvyráběný z žárupevných ocelí, které disponují vysokou pevností za vysokých teplot. Ve všech popsávaných zkouškách byla používána ocel 30CrMoNiV5-11....mat. č. 1.6946.

Klíčová slova: rotor turbíny, svařování plazmou, PAW, žárupevnost, osazení, kořen

ABSTRACT

ZÁŠKODA David: Parametric testing of plasma welding on the root of weld

The subject of this thesis is to assess the suitability of the new process of welding roots of welds by the rotors of steam turbines plasma jet. The new proposed method uses a combination of welding the weld root plasma with the method of submerged-arc welding, however the submerged-arc welding is not the subject of this work.

The tests performed were verified by the possibility of welding the weld root of the plasma jet – Keyhole method without filler material. The aim was to find the optimum welding parameters to achieve the required weld quality, particularly with regard to geometry of weld. Turbine rotors are made of heat resistant steels, which have high strength at high temperatures. In all described tests have been used steel 30CrMoNiV5-11....Mat. No. 1.6946.

Keywords: rotor turbines, plasma welding, PAW, heat resistant steel, recess, root

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZÁŠKODA, D. *Parametrické zkoušky plazmového svařování kořene svaru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉPROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením
vedoucího diplomové práce, a že jsem uvedl všechny použité zdroje.

V Brně dne 26. května 2010

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále firmě SIEMENS Industrial Turbomachinery, s.r.o. za vznik této tématu a možnost na ní pracovat.

Obsah

Zadání.....	-3-
Abstrakt	-5-
Bibliografická citace	-6-
Čestné prohlášení	-7-
Poděkování	-8-
Obsah.....	-9-
1. Úvod.....	-11-
2. Žárupevné oceli	-12-
2.1 Žárupevnost – proces tečení	-12-
2.1.1 Podstata žárupevnosti	-13-
2.1.2 Precipitační zpevnění	-13-
2.1.3 Substitační zpevnění	-14-
2.1.4 Pokles žárupevnosti	-15-
2.2 Rozdělení žárupevných ocelí.....	-16-
2.2.1 Nelegované oceli.....	-16-
2.2.2 Nízkolegované oceli	-16-
2.2.3 Vysokolegované chromové oceli.....	-17-
2.2.4 Austenitické oceli	-18-
2.2.5 Vytvrditelné žárupevné oceli	-18-
2.3 Technologická zpracovatelnost žárupevných ocelí	-18-
2.4 Svařitelnost žárupevných ocelí.....	-19-
2.5 Zkoušení žárupevnosti.....	-21-
2.6 Žárupevné oceli a přídavné materiály	-22-
3. Svařování plazmou.....	-26-
3.1 Svařování klíčovou dírkou	-27-
3.2 Svařitelnost materiálů plazmovým svařováním	-29-
3.3 Volba plynu	-30-
3.3.1 Ochranné plyny.....	-31-
3.3.2 Plazmové plyny.....	-31-
3.4 Svařovací parametry	-32-
4. Parametrické zkoušky – optimalizace svarové hospodárnosti.....	-33-
4.1 Svařovací řízení	-34-
4.2 Hodnocení vzorků	-34-
4.2.1 První sada svarů.....	-34-
4.2.2 Druhá sada svarů.....	-35-
4.2.3 Třetí sada svarů.....	-36-
4.2.4 Čtvrtá sada svarů.....	-40-
4.3 Ocel 30CrMoNiV5-11	-42-
4.4 Výpočet optimálního teploty řehřevu.....	-43-
4.5 Hodnocení povrchu optimálních vzorků	-43-
4.6 Měření mikrotvrdosti HV1	-47-
4.7 Mikrostruktura	-49-
5. Zkoušky protavení osazení.....	-54-
5.1 Svařovací řízení	-54-

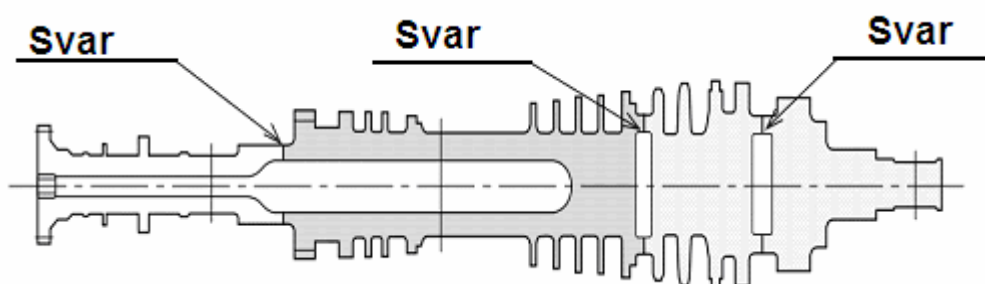
5.2 Provedení zkoušky.....	-54-
5.3 Hodnocení svarů vosazení.....	-56-
5.4 Hodnocení „I“ svarů.....	-58-
5.5 Hodnocení průvarů doplněného materiálu.....	-60-
5.6 Měření tvrdosti HV10.....	-61-
5.6.1 Měření vzorku – parametrizace zkoušky vzorek 5.....	-61-
5.6.2 Měření vzorku – protavení vosazení vzorek 2.....	-63-
5.7 Mikrostruktura.....	-64-
6. Diskuse výsledků.....	-66-
7. Závěr.....	-67-
Seznam použitých zdrojů.....	-68-
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	-71-
Seznam příloh.....	-72-
Přílohy	

1.Úvod [14][20][22]

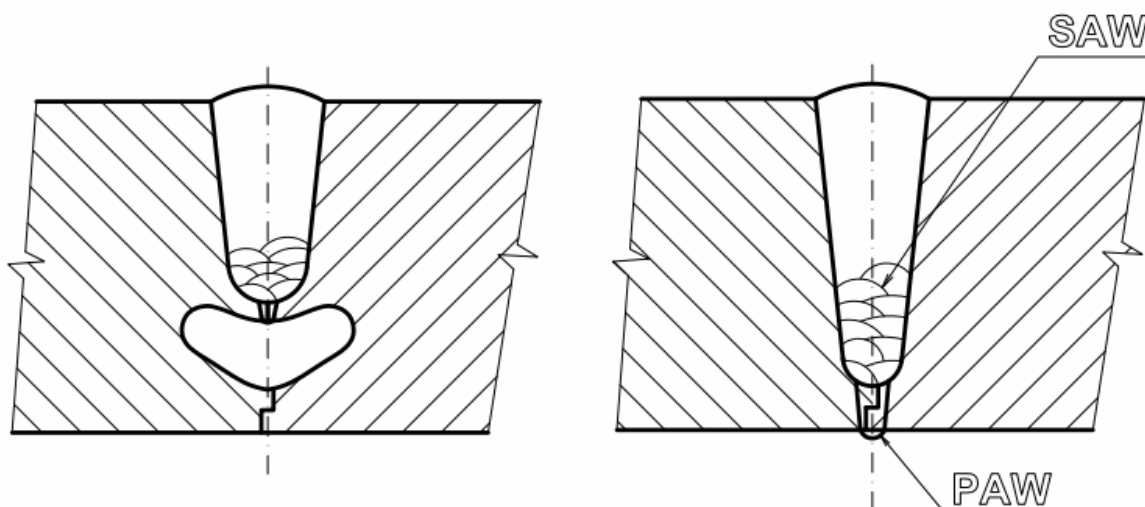
Práce se zabývá svařováním částí rotorů parních turbín. Příklady takových svařových spojů jsou na obr. č. 1.1. Oproti původní technologii zadavatele, firmy SIEMENS Industrial Turbomachinery s.r.o., která využívala technologii svařování TIG/SAW, bude novém postupu využita technologie svařování plazmovým paprskem v kombinaci s metodou svařování pod tavidlem (SAW). Porovnání původní s nově navrhovanou metodou je na obr. č. 1.2. Postup vyhotovení tohoto nově navrženého spoje se skládá ze svařování kořene svaru metodou plazmového svařování a následným dovařením do požadované tloušťky svaru metodou svařování pod tavidlem. V této práci bude pojednáno pouze o svařování kořene svaru plazmou, částí svaru vyhotovenou metodou pod tavidlem se zabývá kolega Bc. Ondřej Lukosz.

Svařování kořene svaru je kritické z hlediska vzniku vad, proto se dosud nejčastěji využívá metody TIG, která ovšem oproti metodě PAW nedosahuje tak hlubokého protavení. V novém postupu byla pro svařování kořene rotoru turbíny zvolena metoda plazmového svařování, z důvodu velmi dobrého protavení kořene svaru. Tato vlastnost plazmového paprsku souvisí s tvorbou kapiláry „Keyhole“. Tato metoda dosahuje spolehlivého protavení celého kořene svaru.

Turbíny, stejně jako mnoho dalších zařízení, které se využívají v energetickém průmyslu, bývají vystaveny vysoké teplotnímu namáhání. Z tohoto důvodu jsou nastavbu těchto zařízení používat speciálních žárpevných ocelí, například typu CrMo, CrMoV, CrMoNiV atd.



Obr. č. 1.1 Příklady umístění řešených svarů [20]



Obr. č. 1.2 Porovnání původní s nově navrhovanou metodou svařování

2. Žárupevné oceli [3][6][7][8][9][10][11][12][13][15][6]

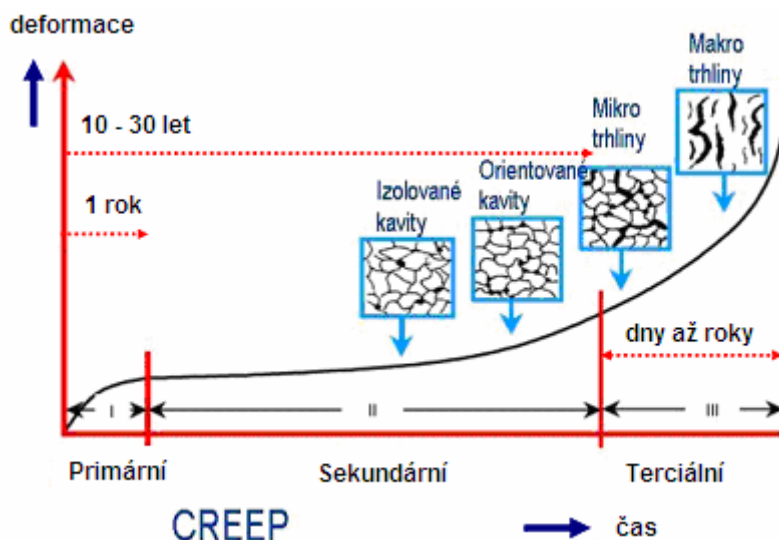
Žárupevné oceli představují širokou skupinu materiálů využívaných pro práci za zvýšených a vysokých teplot. Za těchto teplot je materiál vystaven tzv. creepovému namáhání.

Creep (tečení materiálu) je pomalá trvalá deformace materiálu závislá na čase. K deformaci dochází dlouhodobým působením vysokých teplot a namáháním konstantním zatížením nebo napětím, při čemž napětí nepřesahuje mez kluzu. Oblast creepového namáhání leží přibližně v oblasti teplot $T > 0,4T_m$ kde T_m je teplota tavení materiálu.

Tyto materiály nacházejí široké uplatnění zejména v energetickém a chemickém průmyslu. V tepelné energetice jsou to například rotory parních a spalovacích turbín, svorníky, kotle nebo parovodní a plynárenské potrubí. V chemickém průmyslu například reformingové nádoby, produktovody, reaktory a měřicí aparatury.

2.1 Žárupevnost – proces tečení

Je-li ocel vystavena konstantnímu napětí a konstantní teplotě, dochází v průběhu času k trvalému přírůstu deformace. Závislost deformace na čase – obr. č. 2.1, kterou označujeme jako křivku tečení, lze rozdělit na tři časová stadia. V počátečním stadiu dochází k prvotnímu nárůstu deformace, vlivem zatěžování materiálu v relativně krátkém časovém úseku. Toto stadium je z technického hlediska nejméně významné. Následuje proces tzv. ustáleného tečení, v této části probíhá lineární přírůstek deformace na čas v dlouhém časovém intervalu. Proces tečení pokračuje ve třetím stadiu intenzivním poškozováním struktury kovu, kdy deformace prudce vzroste a dojde k lomu. Z technického hlediska je nejzajímavější druhé stadium, pro které je projektována životnost zařízení.



Obr. č. 2.1 Křivka tečení [12]

Při použití oceli v reálném prostředí energetického průmyslu, jsou součástí vystaveny přetlaku vodní páry o teplotě 400 až 600 °C. Za těchto podmínek již nedostačují běžné krátkodobé pevnostní charakteristiky jako například mez kluzu, respektive mez pevnosti, ale je třeba počítat s procesem tečení jako s hlavním činitelem porušení součástí. Právě zkouškami tečení a zkouškami tečení do lomu získáme nezbytné údaje pro konstrukci zařízení.

pracujících za těchto podmínek. Jedná se o mez pevnosti při tečení za doby 10^{-4} až 2×10^{-5} provozních hodin a mez tečení pro dosažení určitého stupně deformace. Procestečení velice záleží na teplotě a vlnějším napětí, zvýšením teploty hodnot se proces creepu značně urychlí.

2.1.1 Podstata žárupevnosti

Na žárupevnost ocelí mají zásadní vliv faktory, které zpevňují mřížku tuhého roztoku a tím omezují dislokační skluz a difuzní pohyb. Mikrostruktura a její odpovídající užité vlastnosti jsou závislé na typech a podílech přítomných mechanismů zpevňování. Za hlavní zpevňující mechanismy se považuje precipitační zpevňování R_P , substituční zpevňování R_S , dislokační zpevňování R_D a tečení napětím mřížky, R_{P-N} (Pierls Nabarrovo napětí). K jejich stanovení lze využít následujících vztahů.

$R_P = f(l^{-1})$ podíl na celkovém zpevňování 44%
 $R_S = f(x_\alpha)$ podíl na celkovém zpevňování 15%
 $R_D = f(\rho^{1/2})$ podíl na celkovém zpevňování 30%
 R_{P-N} podíl na celkovém zpevňování 11%

l střední vzájemná vzdálenost částic vytvrzujících fází
 x_α obsah legujících prvků rozpouštěných v tuhém roztoku
 ρ střední hustota dislokací

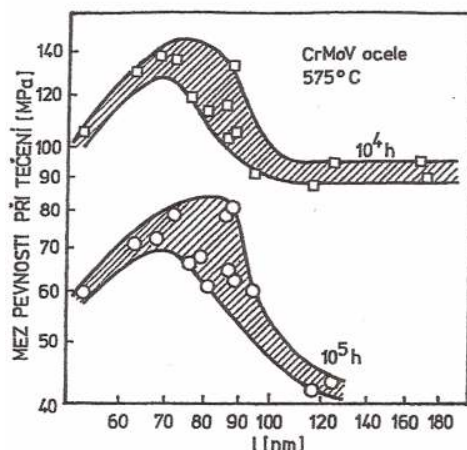
Za nejdůležitější příspěvky zpevňování lze považovat precipitační zpevňování R_P a substituční zpevňování R_S . Bylo prokázáno, že částice precipitátu vyloučené ve struktuře, podobně jako legování tuhého roztoku tzv. „velkými“ atomy MoneboW, omezují dislokační skluz a difuzní pohyb. Tyto procesy tedy účinně zamezují tečení materiálu, který je vystaven vysoké teplotnímu působení.

2.1.2 Precipitační zpevňování

Toto zpevňování je způsobeno částicemi precipitátu v kovu, které jsou-li v dostatečném množství zamezují tečení materiálu za vysokých teplot. Vliv tohoto zpevňování na žárupevnost lze definovat tzv. vzájemnou vzdáleností částic dispersní fáze l_{ef} . Když tato vzájemná vzdálenost částic je menší než velikost subzrna, platí vztah $\epsilon_s = l_{ef}^{-3}$, tedy že rychlost tečení materiálu je přímo úměrná čtverci vzájemné vzdálenosti částic. Jestliže vzdálenost částic dosáhne velikosti subzrna, rychlost creepu ϵ_s již nezávisí na vzdálenosti částic l_{ef} . V tomto případě závisí žárupevnost oceli na substitučním zpevňování tuhého roztoku a dalších zpevňování. Z toho vyplývá skutečnost, že množství, velikost a rozměrová stálost sekundárních fází ve feritických ocelích jsou velmi důležité pro žárupevnost materiálu.

Unízkolegovaných ocelích typu CrMoV má významný podíl na precipitačním zpevňování karbid vanadu (V_4C_3 nebo také VCN). U ocelí typu CrMo jsou to částice karbidu Mo_2C nebo Cr_7C_3 . U chromových ocelí s nízkým obsahem dusíku je zpevňování způsobeno především karbidy $M_{23}C_6$, zatímco u ocelí s vyšším obsahem dusíku jsou to $M_{23}C_6$ a VX (VNaNbCN).

Zmenšení vzájemné vzdálenosti částic l_{ef} , vede k zvýšení meze kluzu a normální teploty - obr. č. 2.2, tak rovněž k výraznému zvýšení meze pevnosti při tečení. Zároveň se snižuje rychlost creepové deformace.



Obr. č.2.2 Vliv vzdálenosti částic na žárupevnost nízkolegovaných CrMoV ocelí [3]

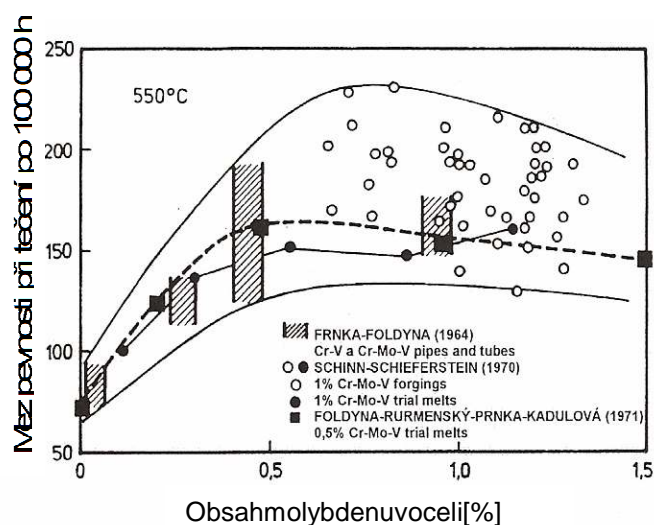
2.1.3 Substituční zpevnění

Substituční zpevnění nebo také zpevnění tuhého roztoku, je vedle již zmíněného precipitačního zpevnění druhým faktorem, který pozitivně ovlivňuje žárupevnost. Významnou roli ve zpevnění tuhého roztoku mají atomy Mo a W. Substitucí těchto prvků v základní mřížce kovu vyvolá její deformaci, tím se vytvoří účinná překážka pohybu dislokací během procesu tečení. Zpevňující účinek těchto prvků se však během creepového procesu postupně ztrácí následkem vyvolávání fází bohatých na Mo a W.

Jestliže ocel obsahuje wolfram, zpevnění tuhého roztoku závisí na molybdenovém ekvivalentu Mo_{eq} .

$$Mo_{eq} = Mo + 0,5W \quad (1)$$

Rychlost tečení nízkolegované CrMoW oceli se zvyšuje pouze do obsahu 0,5% Mo, tomu odpovídá i růst creepové pevnosti. Na obrázku č. 2.3 je po dosažení 0,5% Mo patrný pokles pevnosti.



Obr. č.2.3 Vliv obsahu Mo na creepovou pevnost CrMoV ocelí s obsahem do 0,3% C [7]

U ocelí s devíti procenty chromu, které byly modifikovány molybdenem v rozmezí 0,57 až 2,6 byl rovněž prokázán příznivý vliv Mo. Analýzou experimentů, které dosáhly trvání téměř 10⁵ hodin se prokázalo, že při 600°C se creepová pevnost zvyšuje asi do obsahu 1% Mo.

Tyto výsledky naznačily, že pokusy o další zvýšení odolnosti proti creepu způsobem zvyšování obsahu Mo a W nad již uvedené limity bude neúspěšné pro oba zmíněné typy ocelí. Přelegování ocelí těmito prvky vede naopak k tvorbě nežádoucích fází, které rozpouštějí příznivé VC a VCN nebo tuhý roztok uhlíku. Motvorbou Lavesovy fáze Fe₂Mo, která se vyznačuje nízkou rozměrovou stabilitou.

Významný vliv na zvýšení žárupevnosti u 9% Cr a 12% C u ocelí byl pozorován při legování dusíkem. Mez pevnosti při tečení závisí na obsahu volného dusíku, který nabývá formy nitridu vanadu VN.

2.1.4 Pokles žárupevnosti

Je-li materiál dlouhodobě vystaven vysokoteplotní expozici, dochází u něj vlivem difúze k poklesu precipitačního i substitučního zpevnění. K snížení precipitačního zpevnění dochází vlivem hrubnutí sekundárních fází, které se podílejí na zpevnění, nebo rozpouštěním jemných dispersních částic (MX, M₂X) v průběhu růstu hrubých částic karbidů M₆C nebo intermetalické fáze. K poklesu precipitačního zpevnění dochází vlivem zvětšování vzájemné vzdálenosti částic. K tomu dochází v důsledku hrubnutí karbidů (karbonitridů, nitridů), které vede k rozpouštění malých a růstu velkých částic a zvětšování jejich středního průměru. K porovnání rychlosti hrubnutí různých sekundárních fází slouží konstanty rychlosti hrubnutí K_d, která závisí na změně středního průměru částic v čase.

$$K_d = \frac{d^3 - d_o^3}{t} \quad (2)$$

kde d je střední průměr částic v čase t
 d_o je střední průměr částic v čase $t=0$

Srovnání hrubnutí různých dispersních fází v nízkolegovaných ocelích při 600°C dle následujícího poměru:

M₇C₃:Mo₂C:V₄C₃:VCN
 2206:44:18:1

Analogicky pro modifikované chromové oceli:

Nb(C,N):VN:M₂₃C₆
 0,74:1:44:209

Někdy pro příklady skutečné velikosti vybraných precipitátů – Cr₇C₃ a Mo₂C 50 až 100 nm, VCN 35 až 50 nm, M₂₃C₆ až 100 nm, VN až 25 nm.

Substituční zpevnění klesá s důvodem vyššího obsahu substitučních atomů Mo a W ve slitině oceli, oproti obsahu v tuhém roztoku při pracovní teplotě. To vede k precipitaci fází obsahující Mo a W, což snižuje jejich obsah v tuhém roztoku. Rovnovážnostavupři teplotě asi 600°C se dosáhne asi po 10000 hodinách, vzhledem k životnosti za řízení (10000 až

200000 hodin) je zřejmé, že většinu životnosti zařízení, bude mít ocel nižší obsah Mo a W, v tuhé mrazce než jejich celkový obsah v oceli.

2.2 Rozdělení žárupevných ocelí

Vhodný typ pro použití žárupevné oceli určíme podle její teplotní odolnosti. Teplotní odolnost v sobě zahrnuje například maximální možnou použitou teplotu, pevnostní charakteristiky při zvýšených teplotách a žáruvzdornost. Všeobecně platí, že čím je žárupevná ocel výše legována, zvyšuje se její cena a bývá náročnější na technologie jejího zpracování. Oproti tomu vyšší užitné vlastnosti u legovaných žárupevných ocelí vedou k výslednému odlehčení konstrukcí.

Z hlediska teplotního použití a úrovně legování lze žárupevné oceli rozdělit dle tabulky č. 1.

Typ oceli	Použitelná teplota do (°C)
Nelegované oceli tř. 11 a 12 (do 0,2 hm. % C)	450
Nízkolegované oceli tř. 15	550
Vysokolegované chromové oceli tř. 17 legované (legované Mo, V, Nb, N)	600
Austenitické CrNi oceli	650
Vytvrditelné žárupevné oceli (legované Nb, Zr, N)	700

Tab. č. 1 Rozdělení žárupevných ocelí

Použití ocelí za teplot nad 750 °C je už prakticky nemožné z důvodu velmi nízkých hodnot žáruvzdornosti a žárupevnosti. Pro takovéto teploty se využívají slitiny na bázi niklu (Nimonic) při teplotě do 900 °C, pro vyšší teploty až do 1200 °C se využívá slitina železa s křemíkem a jako W, Mo, Nb nebo kovkeramické materiály z tv. cermety.

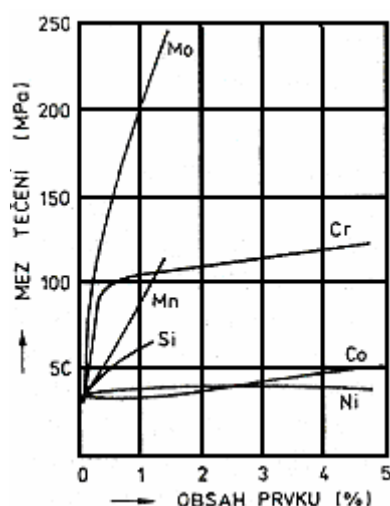
2.2.1 Nelegované oceli

Jedná se o jemnozrnné oceli s nízkým obsahem uhlíku. Jejich maximální pracovní teplota je omezena hranicí opalování. Teoreticky by bylo možné tyto oceli používat až do teploty 520 °C, ovšem při těchto teplotách už vykazují nízké mechanické vlastnosti, proto se využívají jen do teplot asi 450 °C. Mechanické vlastnosti lze u některých ocelí zvýšit zušlechťováním nebo legováním vanadem a niobem. Tyto oceli se používají například na součásti pro výrobu parníků, kotlů, plynových turbín a páry adalších energetických zařízení.

2.2.2 Nízkolegované oceli

Tyto oceli patří mezi nejpropracovanější a nejvíce využívané skupiny ocelí v energetice. Dělí se na oceli pro použití v oblasti meze kluzu a meze tečení. U ocelí první skupiny se zaručuje mez kluzu na normální i zvýšené teploty a dobré plastické vlastnosti. U druhé skupiny meze tečení resp. mez pevnosti při tečení. Tyto oceli vykazují vysokou plasticitu při tečení, dobrou odolnost proti oxidaci a korozi, dobrou svařitelnost a vyhovující fyzikální vlastnosti jako je tepelná vodivost. Obvykle se využívají do teplot

550°C, za vyšších teplot je již mez kluzu nízká a o pal příliš vysoký. Obsah uhlíku a legovacích prvků je nutno volit tak, aby nedošlo k tvorbě cementitu, ale k tvorbě žádaných karbidů, které zpomalují tečení. Karbidy musí být jemné a vzdálenosti mezi nimi krátké. Podle způsobu ovlivnění meze tečení, dělíme legující prvky do tří skupiny. Na prvky, které přispívají k vyšší meze tečení zpevnění tuhého roztoku a zpomalení difúzních pochodů, to jsou prvky Mo a V. Dále na prvky, které vytvářejí jemné fáze tj. karbidy, nitridy a intermetalické fáze, to jsou prvky Mo, V, W, Ti, B a Nb. A třetí skupina prvků ovlivňuje vlastnosti hranic zrn. Vliv těchto a dalších prvků na meze tečení je na obrázku č. 2.4.



Obr. č. 2.4 Vliv vybraných prvků na meze tečení nízkolegovaných ocelí [10]

Meze tečení při 425°C byla definována jako napětí, které vyvolalo 1% deformaci po výdrži na 425°C za dobu 10⁴ hodin. Popřekročení 500°C příznivý vliv Mopatrný z obrázku 2.4 klesá. Molybden jako jediného legujícího prvku se používá zřídka, protože po dlouhé výdrži za vysokých teplot dochází k tvorbě grafitu, který nepříznivě ovlivňuje plastické vlastnosti oceli. Další z hlavních legur je chrom, který zvyšuje meze pevnosti při tečení, pokud má ocel potepelném zpracování bainitickou matici. Vanad jako legující prvek vytváří velmi stabilní karbidy, které jsou-li v matici rozloženy rovnoměrně a jsou mezi nimi malé vzdálenosti, účinně brání pohybu dislokací. Ideální poměr uhlíku k vanadu je asi 1:3, při vyšším obsahu vanadu jeho karbidy hrubnou a jeho zpěvňující účinek se snižuje. Další prvek, který příznivě ovlivňuje meze tečení je bór. Hromadí se na hranicích austenitických zrn. Bór transformuje austenit na bainit za nižších teplot nebo také omezuje výskyt kavit a trhlinek, čímž zpomaluje třetí stádium tečení. Některé žárupevné oceli jsou stabilizovány niobem, který při vrozpuštění v austenitu posouvá v diagramu ARA feritickou oblast doprava. Karbidy a karbidy nitridy niobu se rozpouštějí až za vysokých teplot, proto závisí meze tečení na austenitizační teplotě. Další přídatné prvky jsou mangan a nikl. Ty se v malém množství přidávají do ocelí kvůli zvýšení prokalitelnosti.

2.2.3 Vysokolegované chromové oceli

Tato skupina ocelí začíná na obsahu 5hm% Cr, kvalitativně vyšší žárupevnost představují oceli s obsahy 9% a 12% Cr. Ty bývají dále legovány molybdenem do 1% a vanadem do 0,5%. Oceli této skupiny se používají v rozmezí teplot 600 až 650°C, při těchto teplotách se vyžaduje nejen žárupevnost ale i žáruvzdornost. Jedná se o náhradu austenitických žárupevných ocelí, protože ty za těchto teplot nebývají ještě plně využité a jejich využití je tedy neekonomické. Vlastnosti chromových ocelí silně ovlivňuje molybden,

2.2.4 Austenitické oceli

Chromniklové austenitické oceli

Manganchromové austenitické oceli

2.2.5 Vytvrditelné žárovevné oceli

2.3 Technologická zpracovatelnost žáropevných ocelí

-18-

mikrolegované niobem, ty se po vyválcování, například trubek nebo plechů, používají bez tepelného zpracování.

Nízkolegované žárovevné oceli jsou poměrně dobře svařitelné a lze z nich bez problémů vyrobit požadované hutní polotovary. Používají se v normalizované popuštěném stavu, případně se zušlechťují na feriticko-perlitickou strukturu. Tyto oceli jsou svařitelné za dodržení určitých podmínek. Vysoké rychlosti ochlazování mohou například v okolí svaru způsobit vznik řehkých vrstev, podobně jako precipitace tvrdých dispersních fází ve svaru. Z tohoto důvodu je u nízkolegovaných CrMo a CrMoV ocelí nezbytné přísně dodržovat svařovací postupy. Zejména parametry tepelného příkonu, teploty předehřevu a dohřevu a následujícího tepelného zpracování svarů buď popuštěním nebo kompletním tepelným zpracováním. Dodržovat teplotu předehřevu po celou dobu svařování je zvláště důležité u materiálů v šitých tloušťkách, z důvodu možného nebezpečí vzniku prnutí vedoucích k tvorbě trhlin. Pozornost je třeba věnovat také správné volbě popuštěcí teploty. Příliš nízká volba popuštěcí teploty v rozmezí 550 až 650 °C dochází k precipitaci karbonitridických částic o tzv. kritické velikosti vedoucí k výraznému poklesu vrubové houževnatosti.

Vysokolegované chromové oceli jsou z pohledu výroby a technologické zpracovatelnosti náročnější, cenově drahé a oceli s touto množstvím přidávaných legur. Z pohledu svařitelnosti jsou obtížnější svařitelné než nízkolegované oceli, ovšem přísným dodržováním technologických postupů je možná výroba svařových spojů velkých tloušťek s odpovídající kvalitou. Chromové oceli bývají často samokalitelné, vlivem posunutí ARA diagramu těchto ocelí do prava delšími časy, i nižší rychlosti ochlazování (například na vzduchu) vytvoří výslednou martenzitickou případně bainitickou strukturu. Stejně jako u nízkolegovaných ocelí je třeba dodržovat zvolené teploty předehřevu a dohřevu z důvodů výskytu prnutí a sledovat vlivy vyvolávající křehkost a nečelistvost svařových spojů, jako jsou například tepelný příkon, geometrie svaru, způsob vedení a rychlost svařování. Svary je třeba tepelně zpracovat a to buď popuštěním nebo zušlechťováním normalizačním popuštěním.

Austenitické žárovevné oceli si navíc vykazují vysokou odolnost proti tečení, to je ovšem vyváжено obtížnou zpracovatelností a vysokou cenou přidávaných legur. Z pohledu svařování nezpůsobují gamam řízkavou transformaci prnutí, nadruhé straně má tepelná vodivost a velká tepelná roztažnost způsobují vysoká tepelná prnutí. Přídatné materiály v štinou kopírují základní materiál, někdy se přidává poměrně vysoký obsah niklu. Svařové spoje se obvykle provádí bez předehřevu, je-li předepsáno tepelné zpracování, zahrnuje rozpouštěcí žhání následným kalením do vody. U vytvrditelných ocelí se pro zvýšení žárovevnosti může provést vytvrzovací režim z teplot kolem 750 °C.

2.4 Svařitelnost žárovevných ocelí

Svařitelnost je vlastnost materiálu složená ze svařitelnosti materiálové, technologické a konstrukční. Vliv na svařitelnost materiálu mají faktory jako chemické složení, metalurgie výroby, čistota a struktura oceli, svařového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. V porovnání s oceli, které pracují v podcreepové oblasti (do 350 °C), je třeba volit teploty předehřevu a dohřevu, a následné tepelné zpracování zohledně na požadovanou žárovevnost svařového spoje. Výzkumem bylo prokázáno, že důležité procesy se projevují při chladnutí svaru na teplotu předehřevu v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Požadované struktury v TOO dosáhneme řízením metalurgicko-technologických postupů svařování. Základem je volba vhodného tepelného zpracování před svařováním, teploty předehřevu, způsob ochlazování v průběhu svařování a tepelného zpracování po svařování.

Obecně se pro tvářené nízkolegované oceli před svařování doporučuje normalizační žhání následným žháním proti vnitřním pnutí nebo zušlechťování. U odlitků z těchto ocelí se provádí žhání naměkko následně homogenizační žhání.

Žárupevné oceli je možné svařovat všemi běžnými metodami svařování. Přídavné materiály se dodávají z doporučeným postupem tepelného zpracování s svařování. Přídavný materiál musí vykazovat stejné mechanické, fyzikální, chemické a technologické vlastnosti se základním materiálem. U přídavných materiálů musíme sledovat maximální popouštění teploty s svařování z tohoto důvodu, že svařový kov nemůže být popouštěn z vyšší teploty než základní materiál, což by vedlo k celkovému snížení mechanických hodnot svařence.

Základní požadavky na nové žárupevné oceli jsou spojeny s vyšší houževnatostí a odolností proti vzniku řehekého lomu i z teplot okolí. Tyto požadavky splňují oceli s nízkým obsahem uhlíku, které tvoří strukturu, jejíž podstatnou částí je bainitický ferit. Nejduležitější vlastností této struktury z hlediska svařování je její odolnost proti vzniku trhlin. Jemnozrnnost oceli z hlediska svařování, příznivě ovlivňuje odolnost proti řehekému lomu tím, že posouvá tranzitní teplotu houževnatosti směrem k nízkým teplotám. Při zkoumání svařitelnosti některých ocelí se ukázal jako velmi vhodný titan. Jeho přítomnost má na žárupevnost minimální vliv, naopak příznivý vliv se projevil na plasticitě zejména TOO svařových spojů. U zkušebních vzorků ovlivněných svařováním se tažnost zvýšila z 5% na 10%. Z hlediska spolehlivosti svařových spojů žárupevných ocelí to lze považovat za významné zlepšení jakosti moderních nízkolegovaných žárupevných ocelí. Titan ovšem nesmí být ve formě vloček, ale ve formě karbidických nebo karbonitridických precipitátů.

Při svařování žárupevných ocelí je kladen důraz na celistvost svařových spojů. Ty musí být bez poškození vzniklých prasklin a prasklin. Pro postup svařování a pro určení svařitelnosti lze využít norma ČSN EN 1011-2 Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí. V dodatku C3 jsou doporučení ke snížení vzniku trhlin za studena indukovaných vodíkem v nízkolegovaných žárupevných ocelích. Vliv chemického složení na vzniku trhlin za studena je vyjádřen uhlíkovým ekvivalentem CET, který zvýrazňuje důsledek účinku uhlíku.

$$CET = C + (Mn + Mo) / 10 + (Cr + Cu) / 20 + Ni / 40 \quad (3)$$

Teplotu ředehřevu T_p lze vypočítat dle následujícího vzorce.

$$T_p = T_{pCET} + T_{pdl} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad (4)$$

.... T_{pCET} teplota uvažující vliv ekvivalentu uhlíku

.... T_{pdl} tloušťka

.... T_{pHD} obsah difúzního vodíku

.... T_{pQ} tepelný říkon

V normě EN 1011-2:2000 můžeme teplotu předehřevu určit z uvedených grafů. Pro oceli, které jsou náchylné k tvorbě trhlin za studena se doporučuje dohřev z teploty 250°C podobu dvou hodin. Tato podmínka platí pro CET vyšší než 0,56.

V dodatku D je pojednáno o důsledcích doby ochlazení $t_{8/5}$ (v rozmezí teplot 500 až 800°C) na výslednou strukturu v souvislosti s tažností, vrubovou houževnatostí a tvrdostí na TOO svařového spoje. Od 12 mm tloušťky se doba ochlazení počítá jako trojdimenzionální, proměnitelná tloušťka jako dvojdimenzionální. U svařování žárupevných ocelí se považuje také určit náchylnost na nebezpečí vzniku krystalizačního praskání. Údaje o potlačení vzniku těchto trhlin najdeme v dodatku E - Eliminace krystalizačního praskání, již zmíněné normy. Výpočet pro hodnocení krystalizačního praskání souvisí především s chemickým složením

svarového kovu, jedná se o následující rovnici UCS. Hodnoty pod 10 UCS vykazují dobrou odolnost proti krystalizačním praskáním.

$$UCS = 230.C + 180.S + 75.P + 45.Nb - 12,3.Si - 5,4.Mn - 1(5)$$

ZARAdiagramu žáropevných ocelí shodnotou meze kluzu kolem 600°C vyplývá, že jejich struktura bude martenziticko-bainitická případně feriticko-bainitická. Z toho vyplývá větší náchylnost k tvorbě trhlin za studena. Důležitým faktorem, který ovlivňuje tuto tvorbu trhlin, je relativní vlhkost okolního prostředí. Pro svařování žáropevných ocelí se doporučuje relativní vlhkost prostředí do 50% a vysušování elektrod a videl před svařováním.

2.5 Zkoušení žárupevnosti

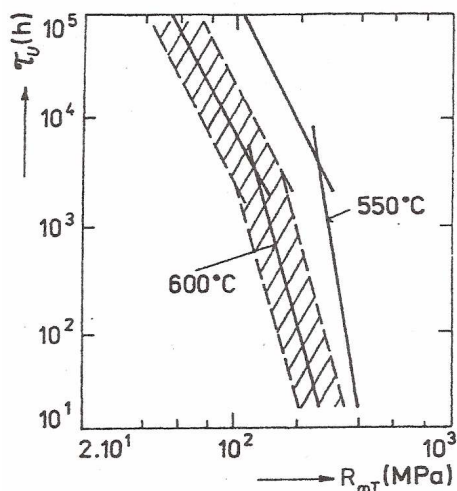
Stanovení závazných hodnot pevnosti při tečení pro konkrétní ocel je dlouhodobý proces založený na provedení velkého počtu zkoušek tečení, kde je třeba respektovat varianty struktury, chemického složení a tepelného zpracování dané oceli. Pro predikci žárupevnosti, tedy stanovení odolnosti materiálu proti dlouhodobému zatížení za vysokých teplot, se využívají dvě základní zkoušky. Jedná se o zkoušku tečení do lomu (RT) a zkoušku tečení s měrnou deformací.

U zkoušky tečení s měrnou deformací se měří pomocí speciálních extenzometrů průběh křivky tečení vsouřadnicí deformace – čas, například křivky na obr. č. 2.1. Určení ří časových pásem, primární, sekundární a terciární větve, je důležité zejména pro určení rychlosti stacionárního creepu, která je základním kritériem žárupevnosti. Tento údaj lze pomocí korelační hvztahů do jisté míry použít pro stanovení doby do lomu (např. Monkman – Grantův diagram). Využívá se zejména kuřčení zůstávající životnosti komponent, které jsou již u řičtou dobu provozovány. Ovšem tyto zkoušky jsou oproti zkouškám tečení do lomu nesrovnatelně dražší.

U zkoušky tečení do lomu nebotaké RT zkoušky, sledujeme údajecelkové deformace a dobu v okamžiku creepového lomu. Oproti předchozí metodě tato zkouška méně náročná, ovšem nezískáme průběh křivky tečení. Výsledky se vlnášejí do souřadnic $\log t - \log \sigma$, kde t je doba do lomu a σ je aplikovaná napětí. Tato závislost lze pro danou teplotu nahradit podle mechanismu creepového porušení nahradit soustavou přímek. Při požadavcích na hodnotu meze pevnosti při tečení za časů např. 10^5 hodin (asi 10 let) je prakticky nemožné získání těchto hodnot pomocí reálných časů. Z těchto důvodů se vyhodnocení výsledků provádí pomocí řady extrapolací postupů. Jeden z nejčastěji používanějších způsobů extrapolace je například dle Larson – Millera. Provedení zkoušky předpokládá zkoušení při 3 až 4 teplotách zvolených kolem předpokládané teploty dlouhodobé expozice. Z těchto teplot zkoušek tečení dosahujících při nižších napětích časů nad 10^4 hodin se vypočtou soubory přímek, které již umožní seriózní odhad meze pevnosti při tečení za 10^5 hodin. Příklad pro nízko legovanou CrMoV ocel na obr. č. 2.5.

Provedení vlastních zkoušek probíhá na zkušebních strojích s vyvozením statického zatížení v tahu. Zatížení bývá vyvozeno pákovým mechanismem nebo pomocí cejchované pružiny. Podmínkou pro obě zkušební metody je dosažení a regulace požadovaných zkušebních teplot, odchylka po celou dobu zkoušky nesmí překročit nornovaných $\pm 3^\circ\text{C}$, vsoučasnost lze pomocí regulátoru dosáhnout až $\pm 1^\circ\text{C}$.

Mezi zvláštní zkoušky, které uvádějí další žadané parametry v prostředí vysokých teplot patří například zkoušky relaxace nebo kombinace testu creep – únava, kdy vedle statického creepového zatížení je materiál vystaven jak nízkocyklovému, tak vysokocyklovému únavovému namáhání.



Obr. č. 2.5 Závislosti doby do lomu na aplikovaném napětí pro konstantní teploty zkoušení 550 a 600 °C pro nízkolegovanou CrMoV ocel. Šrafovaná oblast – rozptýlení výsledků zkoušení. [3]

2.6 Žárupevné oceli a řídavné materiály

Vývoj a výroba p řídavných svařovacích materiálů pro žárupevné oceli používaných zejména v energetickém průmyslu, má důležitý význam pro zpracování široké palety těchto ocelí. Kromě osvědčených materiálů, nově vyvinuté žárupevné oceli jako například T/P23, T/P24 nebo P92 umožňují v oblasti energetického průmyslu dosahovat výrazně vyšší účinnosti, tím se snižují celkové náklady a zlepšuje se ekonomika provozu.

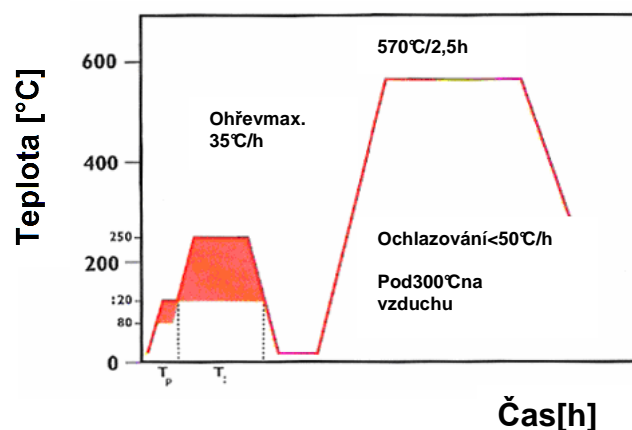
Následně bude uvedeno několik důležitých ocelí používaných v elektrárnách, včetně doporučených p řídavných materiálů pro jejich svařování, základních mechanických vlastností a doporučeném tepelném zpracování. Uvedené p řídavné materiály jsou vyráběny německou firmou T-PUT (T-Phoenix Union Thermanit). Zeskupiny feriticko/bainitických ocelí bude ocel 15NiCuMoNb5 (WB36), T/P23 a T/P24, a z martenzitických ocelí materiál P91 a P92. Mechanické vlastnosti p řídavných materiálů musí odpovídat použitému základnímu materiálu. Mechanické vlastnosti určuje optimální chemické složení materiálu, ale i podmínky svařování, proto bude zmíněno jejich zpracování a svařování. Hodnoty mechanických vlastností uvedených v následujících tabulkách jsou při +20 °C a doba výdrže při tepelném zpracování se určuje dle šrafování.

15NiCuMoNb5 (WB36)

Tab.2 [13]

označení	mat. č.	ASTM	elektroda	WIG	drát/tavidlo	T.Z. (°C/h)	Rp0,2 (Mpa)	Rm (Mpa)	Av(J)	Prac.tep. (°C)
15NiCuMoNb5	1.6368	-	Phoenix SH Schwarz3K Ni	Union IMo	Union S3NiMo1/ UV420TT(R)	580/2h	500	590	160	<545

Vysokopevný materiál na bázi NiCuMo, pro použití v elektrárnách i pro chemické reaktory s pracovní teplotou vyšší než 350 °C. Na tento materiál jsou z bezpečnostních důvodů kladeny vysoké požadavky na houževnatost. Svarový spoj vyžaduje tepelné zpracování (žihání i odstraňování nitřního napětí) – obr. č.2.6.



Obr. č.2.6 Doporučené tepelné zpracování pro materiál WB36 [15]

Kotlové trubkové ocele HCM2S(T/P23) a 7CrMoVTiB10 -10(T/P24)

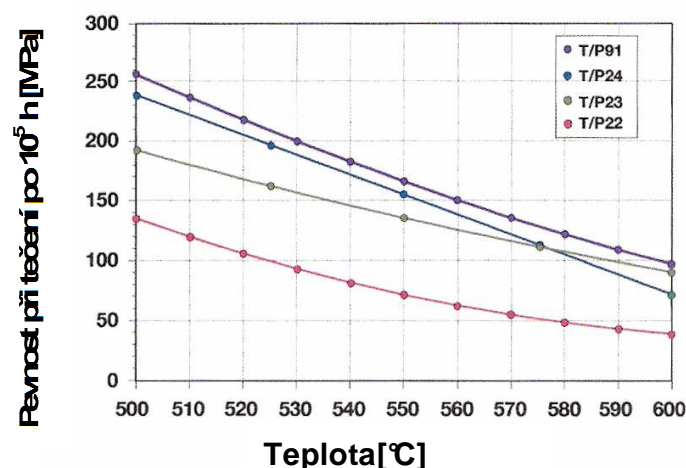
Tab.3[13]

označení	mat. č.	ASTM	elektroda	WIG	drát/tavidlo	T.Z. (°C/h)	Rp0,2 (Mpa)	Rm (Mpa)	Av(J)	Prac.tep. (°C)
HCM2S	7:7777	T/P23	Thermanit P23	Union IP23	Union SP23/UV420TT(R)	740/2h	509	625	136	<550

Tab.4[13]

označení	mat. č.	ASTM	elektroda	WIG	drát/tavidlo	T.Z. (°C/h)	Rp0,2 (Mpa)	Rm (Mpa)	Av(J)	Prac.tep. (°C)
7CrMoVTiB10-10	1.7378	T/P24	Thermanit P24	Union IP24	Union SP24/UV420TT(R)	740/2h	577	689	150	<550

Stále se zvyšující požadavky na teploty a tlaky pa r, pro které již nedosta čovali stávající materiály, vedly k vývoji t ěchto nových základních materiál ů, které se využívají zejména pro výrobu membránových st ěn a kotlových trubek. Krom ě tohoto využití jsou vhodné i pro silnost ěnné komponenty.



Obr.2.7 Porovnání hodnoty řídícího období zátěžení ocelí P91, P24, P23 a P22 za r úžných teplot [15]

Svarový kov zhotovený metodou TIG vykazuje vysokou pevnost, houževnatost a tvrdost do hodnoty 300HV. Dotlouš ťky 10 mm není nutné tepelné zpracování. P ři v ětších

tloušťkách svařovaného materiálu nebo pro použití metod svařování pod tavidlem svařování obalovanou elektrodou, se zařazuje tepelné zpracování svařování 740°C podobu dvou hodin. Přídavné materiály těchto ocelí nejsou legovány titanem jako základní materiál, ale niobem, protože titan ve elektrickém oblouku vyhořívá. Na obrázku č. 2.7 vidíme porovnání těchto ocelí při dlouhodobém zatížení materiálem P22, kde je patrné výrazné zlepšení pevnostních vlastností.

Martenzitické oceli X10CrMoVNb9-1(P91) a X10CrWMoVNb9-2(P92)

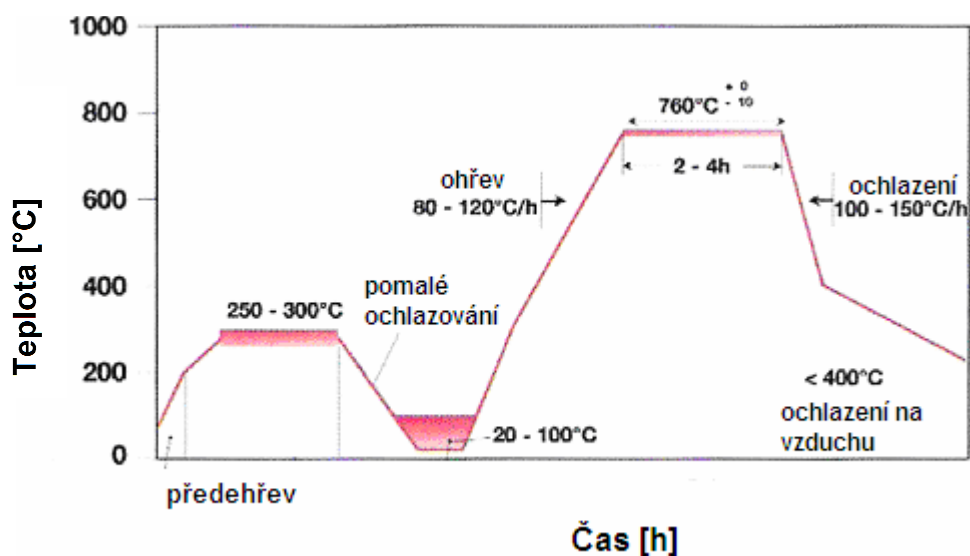
Tab.5[13]

označení	mat. č.	ASTM	elektroda	WIG	drát/tavidlo	T.Z. (°C/h)	Rp0,2 (Mpa)	Rm (Mpa)	Av(J)	Prac.tep. (°C)
X10CrMoVNb 9-1	1.4903	T/P91	Thermanit Chromo9V ChromoT91	Thermanit MTS3	Thermanit MTS3/Marathon543	760/2h	600	750	50	<585

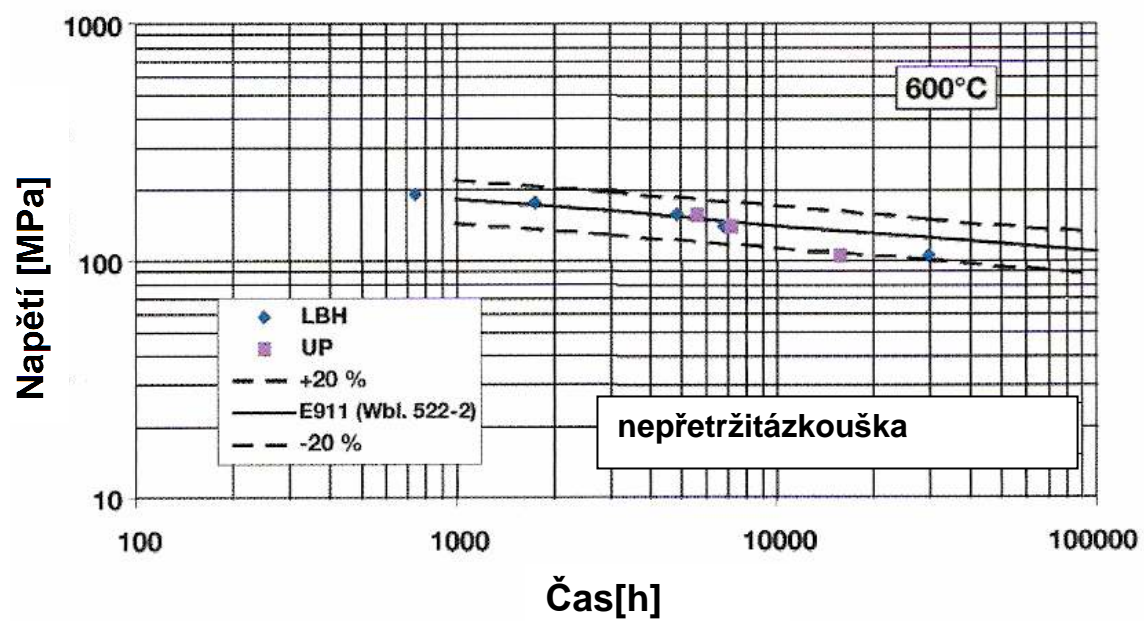
Tab.6[13]

označení	mat. č.	ASTM	elektroda	WIG	drát/tavidlo	T.Z. (°C/h)	Rp0,2 (Mpa)	Rm (Mpa)	Av(J)	Prac.tep. (°C)
X10CrWMoVNb 9-2	1.4903	T/P92	Thermanit MTS616	Thermanit MTS616	Thermanit MTS616/Marathon543	760/2h	600	750	45	<625

Martenzitické žárupevné oceli se používají pro potrubí ostré páry, především v oblasti potrubí pro komory. Původně používané oceli na bázi 12% Cr se nyní nahradily nově vyvinutými ocelmi s 9% Cr, což jsou právě P91, P92 a také E911. Tyto oceli vykazují vyšší pevnost a díky nižšímu obsahu uhlíku i příznivější svařovací vlastnosti. Snížený obsah C také snižuje nebezpečí tvorby trhlin za studena. Teplota předehřevu a interpass se pohybuje v rozmezí 200 až 300°C. Vzhledem k poměrně vysokému vlivu použité technologie na houževnatost svarového kovu, se svařování volí jako vícevrstvé smalou tloušťkou housenky. Tepelné zpracování těchto ocelí můžeme vidět na obr. č. 2.8. Hodnoty teplot tohoto TZ nesmí být výrazně překročeny, jinak hrozí tvorba nepopuštěného martenzitu místo požadovaného austenitu. Při vystavení materiálu vysokým teplotám dochází k poklesu napětí v čase. Na obr. č. 2.9 je diagram poklesu napětí při dlouhodobém zatížení pro ocel P92 za teploty 600°C.



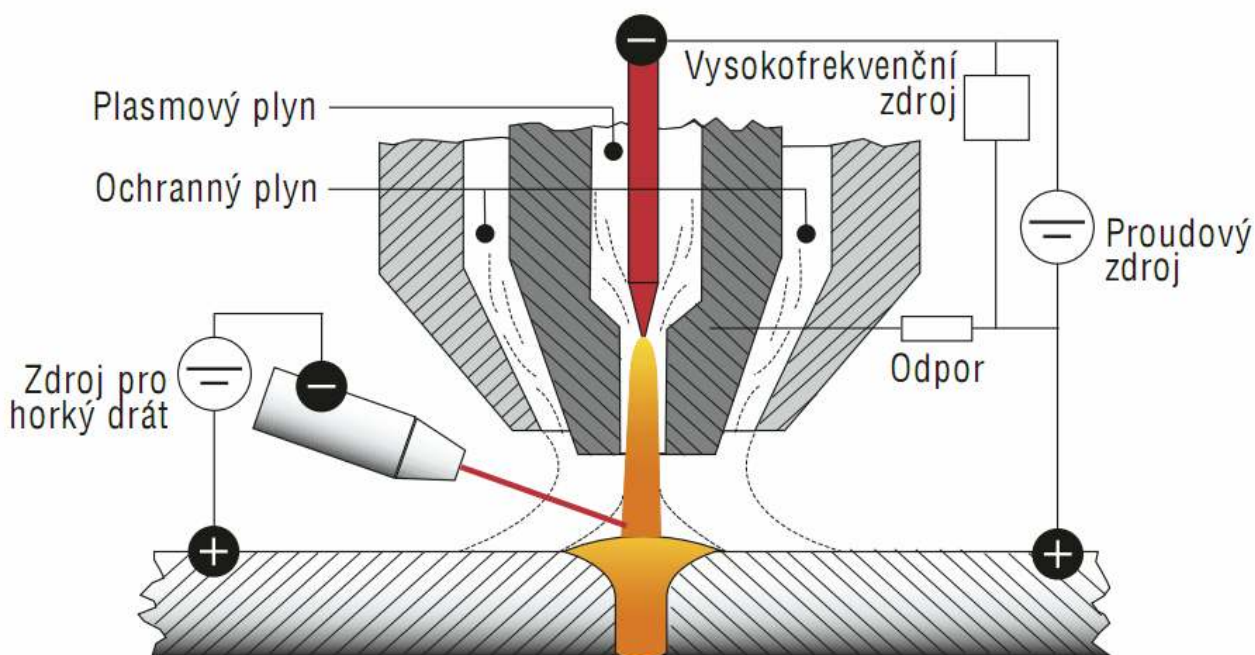
Obr. č.2.8 Doporučené tepelné zpracování pro 9% Cr oceli P91, P92 a E911 [15]



Obr. č.2.9 Pokles napětí materiálu P92 při dlouhodobém zatížení [15]

3.Sva řování plazmou [1][4][16][17][18][19][23][24][25][26][27]

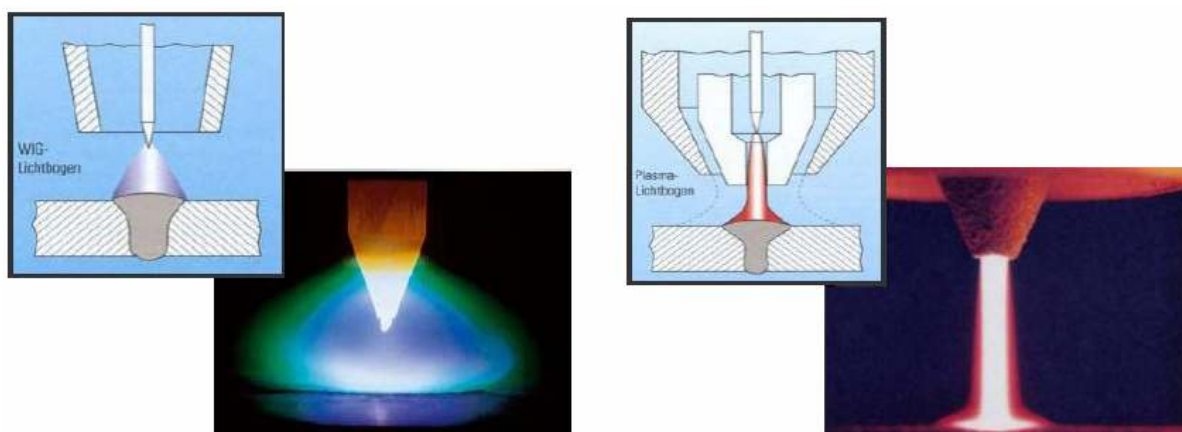
Sva řování plazmou nebo také PAW - Plasma Arc Welding, je nejmladší metoda svařování sv ětelným obloukem, byla vyvíjena od roku 1957 ameri čanem Robertem F. Gagem. Je to moderní vysoce produktivní metoda oblo ukového sva řování v ochranné atmosféře. Základní schéma plazmového sva řování je na obr. č.3.1.



Základní komponenty plazmového svařovacího hořáku

Obr. č.3.1 Základní schéma plazmového sva řování [18]

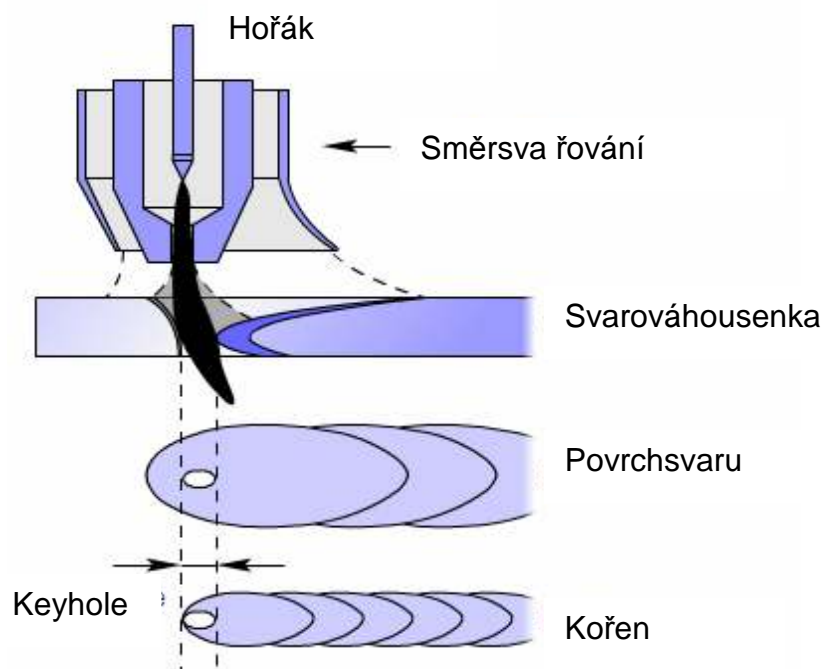
Plazmový oblouk je charakterizován vysokou koncentrací energie a vysokou pracovní teplotou. Sva řování plazmou je metoda podobná technologii TIG (WIG), vznikla jejím vývojem a zaru čuje vyšší produktivitu. U obou technologií oblouk h oří mezi netavící se (wolframovou) elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního plynu. Na obrázku č. 3.2 je zobrazeno porovnání paprsk ů obou technologií. Oproti metod ě TIG je keramická hubice nahrazena kovovou tryskou menšího průměru, která je intenzivně chlazena vodou nebo plynem a zužuje oblouk na pom ěrně malou plochu sva řence. Ke zúžení oblouku se využívá koncentrace tepla a dynamický ů činek plazmy. Plazmový plyn proudící z trysky, se vlivem tepla oblouku prudce roztahuje, m ění se v plazmu a proudí otvorem velmi vysokou rychlostí. Díky specifickým vlastnostem plazmového oblouku, je na rozdíl od metody TIG možné plazmu používat i pro mikro aplikace. Při sva řování materiál ů do tloušťky 3mm je způsob sva řování srovnatelný s metodou TIG. Při větší tloušťkách dochází v důsledku větší koncentrace energie v plazmovém oblouku k vytvo ření tzv. „klíčové díry“ (Keyhole).



Obr. č.3.2 Porovnání metody TIG s metodou plazmového svařování [17]

3.1 Svařování klíčovou dírkou

Tato „klíčová díрка“ neboli „keyhole“ – obr. č. 3.3, podporuje hluboké pronikání oblouku do materiálu a umožňuje vyšší rychlosti svařování. Vyšší rychlost svařování způsobuje oproti metodě TIG menší deformace. Je to otvor, kde oblouk přechází přes materiál a nachází se na přední straně tavné lázně. Díky povrchovému napětí dochází vlivem pohybu hořáku za klíčovou dírkou k vytvoření spojení svarového kovu za klíčovou dírkou. Díky tomuto efektu umožňuje tato technologie svařovat materiály na tupo – typ I, tedy bez úprav svarového úkosu, až do tloušťky 8 mm na jeden průchod. Tím se významně snižuje spotřeba přídavného materiálu a to až na desetinu, což je z hlediska ekonomiky svařování významný přínos. Vysoká kvalita svaru je zajištěna především snadnou kontrolou průvaru, malou citlivostí na změnu délky oblouku, vysokou stabilitou oblouku a malou teplotní ovlivněnou oblastí. Tato metoda je velmi vhodná pro automatizaci.



Obr. č.3.3 Schéma tvorby klíčové dírky [19]

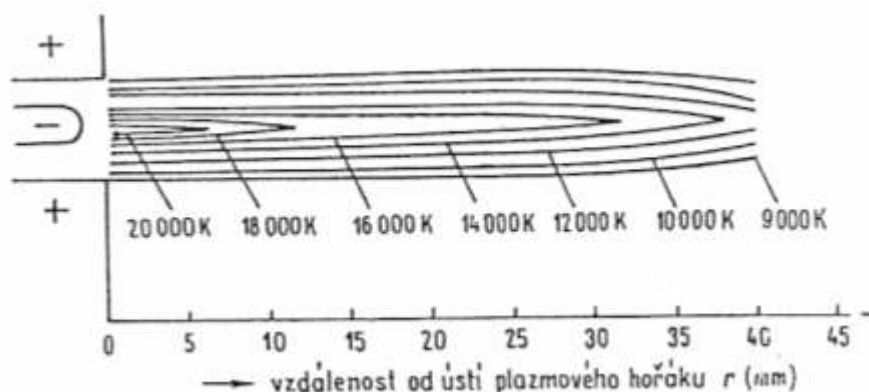
Předností plazmového svařování je charakteristický tvar svaru – zejména kořene svaru, což umožňuje svařování bez podložky kořene až do tloušťky 10 mm. Ve srovnání s laserovým paprskem má plazmový nižší koncentraci energie, ovšem nesrovnatelně vyšší energetickou účinnost a nižší celkové provozní náklady.

Princip svařování plazmou spočívá v ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. Plazma jako fyzikální pojem je speciální stav plynu, někdy označovaný jako čtvrtý stav hmoty. Plazma vzniká ionizací plynu, při které dochází k vyražení nebo uvolnění valenčních elektronů z vnějšího orbitu atomu. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a ionizované jádro atomu kladný náboj. Elektrony v plazmě slouží jako vodič proudu. V praxi se jako zdroj potřebné značné energie pro ionizaci používá nejčastěji elektrický oblouk, zvýšením teploty oblouku dosahujeme vyššího stupně ionizace. Stupeň ionizace je tedy závislý na teplotě, úplná ionizace se dosahuje asi při 100 000 K, ovšem při svařování dosahujeme teplot podstatně nižších a plazma se ionizuje jen částečně. Částečně ionizovaný plyn slouží k stabilizaci paprsku v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěny trysky. U dvouatomových plynů (N_2, O_2, \dots) musí dojít nejprve k rozkladu molekul na atomy.

Příklady průměrných teplot plazmy pro jednotlivá prostředí:

Dusík.....do 9000 K
Vodík.....do 10000 K
Argon.....do 16000 K
Helium.....do 20000 K
Stabilizace vodou.....do 35000 K

Rozložení teplot v plazmovém paprsku je znázorněno na obrázku č. 3.4.



Obr. č. 3.4 Rozložení teplot v argon-vodíkové plazmatu [4]

Kromě plazmového a ochranného plynu se při svařování využívá ještě fokusační plyn, který zužuje paprsek. Ke kontrakci paprsku přispívá i zúžení výstupní trysky. Fokusační plyn bývá obvykle smíšením argonu s vodíkem nebo dusíkem.

V praxi používáme dvě možnosti elektrického zapojení hořáku, zapojení závislé (přenesený oblouk) a zapojení nezávislé (nepřenesený oblouk). U zapojení závislého obr. č. 3.1 je záporný pól připojen ke elektrodě a kladný ke svařenci. Pro zapálení hlavního oblouku se používá pomocný oblouk, který vytvoří dostatečně vodivé prostředí pro vytvoření hlavního oblouku i na delší vzdálenost. Toto zapojení se používá především pro svařování navařování a řezání. U nezávislého zapojení se pól připojí ke elektrodě a ke kovové trysce. Využívá se u žárových nářadí k úpravě povrchu ohřevu.

Dvouatomové plyny mají velkou tepelnou kapacitu a vysokou spotřebu energie, která je vynaložena na disociaci. Spolu s vysokou tepelnou vodivostí vodíku tím odebírají teplo z vnějších vrstev plazmového paprsku. Plazma se tím zužuje, zvyšuje se její teplota a tím i

stupeň ionizace a elektrická vodivost. Při kontaktu plazmy s materiálem dojde k ochlazení, to vede k opačnému procesu tzv. rekombinaci. Při rekombinaci dochází ke slučování elektronů s ionty zpět na atomy. Účinnost přenosu akumulovaného tepla do materiálu je 70 až 80%.

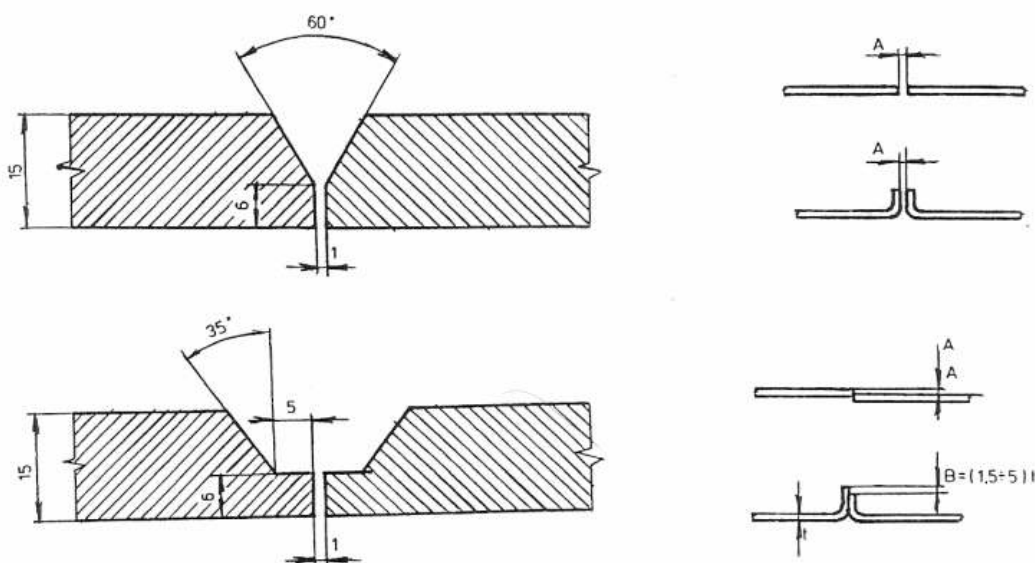
Při ohřevu plazmového plynu obloukem senzorů kolik násobně zvětšuje jeho objem a to vede k vysokým výstupním rychlostem plazmy. Při svařování musí být dodržena rovnováha mezi dynamickým účinkem dopadající plazmy a povrchovým napětím taveniny, kvůli případnému vyfukování taveniny zespáry. Výstupní rychlost plazmy při svařování bývá asi 200 až 500 m/s.

3.2 Svařitelnost materiálů u plazmového svařování

Svařitelnost materiálů i parametry svařování jsou obdobné jako u metody TIG. U plazmového svařování ovšem dosahujeme vysokých svařovacích rychlostí, spolehlivého provaření kořene a výhodného poměru šířky ku hloubce svaru, který se pohybuje v rozmezí 1/1,5 až 1/2,5. Plazmou lze svařovat všechny druhy ocelí, mangan, hliník, titan, nikl, molybden a jejich slitiny. Pro vysokolegované oceli tloušťky 2 až 10 mm se parametry svařování používají v těchto rozmezích – napětí 28 až 40 V a svařovací proud v širokém rozptí 40 až 300 A. Obdobné parametry svařování používají pro nikl a jeho slitiny. Pro titán jsou tyto hodnoty o 15 až 20% nižší. Rychlost svařování provedené parametry až 200 cm/min. Při svařování hliníku např. o tloušťce 6 mm se používá středový proud, který při svařovacím cyklu má asi 140 A v čase 20 ms a při čistícím cyklu 180 A v čase 3 ms. Pro materiály náchylné k praskání používáme impulsní proud.

Úprava svarových ploch

Díky efektu klíčového díry jak již bylo popsáno dříve, můžeme plazmovým paprskem spolehlivě svařovat tupé svary typu I do větších tloušťek bez úpravy svarového úkosu. Například nerezavějící austenitická ocel lze takto bez úpravy svarového úkosu svařovat do tloušťky 10 až 12 mm. Mezera mezi svařovanými materiály bývá v tomto případě 0,5 až 1 mm. U nelegovaných ocelí se úkosy neupravují do tloušťky 6 mm. U materiálů v těchto tloušťkách používáme úkosy jejichž příklady jsou na obrázku č. 3.5.



Obr. č. 3.5 Úprava svarových ploch vysokolegované CrNiCo oceli [4]

Výhody plazmového svařování

- vyšší rychlost svařování
- menší tepelná ovlivňovaná oblast, a tím menší deformace
- menší porývnost svaru, a tím snížení pracovního následného opracování svaru
- zachování řízných mechanických hodnot základního materiálu
- vysoká životnost elektrody (pilotní oblouk)
- vynikající vzhled svaru a snadná reprodukovatelnost
- vynikající kvalita svaru bez porů a bublin (rentgenovou čistotu)
- velmi dobrý průvaritvar svaru
- snížení pracovního přípravy svarových ploch
- svařování bez podložní kořene
- dotloušťky 8 mm není nutné svařovat plochy úkosovat,
- lze svařovat jedním průchodem pouze z jedné strany
- úspora řídného materiálu
- možnost svařování řídnými impulsními proudem
- možnost mechanizace

3.3 Volba plynu

Nejběžnějším a nejúspěšnějším plazmovým a ochranným plynem, který je používán v řadě svařovacích aplikací je argon. Kombinace argonu s heliem umožňuje použití slabšího proudu, to se příznivě projevuje na životnosti elektrody a hořáku. Pokud je podíl helia ve směsi nad 30%, přenášejí se do svařovaného materiálu víc tepla, což může nepříznivě ovlivňovat svařovací proces a vlastnosti svaru. Tato směs se používá pro svařování hliníku do tloušťky asi 8 mm. I když směs argonu s heliem má vyšší tepelnou vodivost než samotný argon, je obtížné zvyšovat rychlost svařování cílem kompenzovat zvýšení svařovací teploty. Svařovací rychlosti jsou tedy pro oba plyny stejné. Dalšími používanými plyny jsou například vodík a dusík. Příklad použití plynu v tabulce č. 7.

Plazmový plyn	Materiál (oblast použití)/účinek
Argon	= všechny metalické materiály = standardní plyn = dobré zapalovací vlastnosti = dobrá stabilita plazmového oblouku
Ochranný plyn	Materiál (oblast použití)/účinek
Argon	= všechny metalické materiály = standardní plyn = dobré zapalovací vlastnosti = dobrá stabilita plazmového oblouku
Ar/H₂ směs	= nelegované a austenitické ocele = nehodné pro (Ti, Zr) nebo feritické materiály (duplex) jakož i pro AL a Cu materiály = zlepšená ochrana před korozí = zvýšená svařovací rychlost
Ar/He směsy	= všechny materiály = zvýšená svařovací rychlost = horší zapalovací vlastnosti

Tab. č. 7 Použití plazmových a ochranných plynů [17]

Plazmových a ochranných plynů existuje široká škála, podrobněji budou zmíněny pouze nejčastěji používané, již zmíněný argon, helium, vodík a dusík. Tyto plyny jsou meta-ké a využívají se pro zkoušky v experimentální částitě práce, konkrétně směs argonu s vodíkem.

3.3.1 Ochranné plyny

Argon - je jednoatomový plyn bez barvy a zápachu, který je inertní a nevytváří s žádným jiným prvkem chemické sloučeniny. Argon má malou tepelnou vodivost a relativně nízký ionizační potenciál asi 15,8 eV. Z těchto důvodů se v něm dobře zapaluje oblouk a je stabilní při relativně velké délce. Oblouk umožňuje velké proudové zatížení a tím vysokou teplotu oblouku. Argon je těžší než vzduch a to přispívá k lepší ochraně svaru a nižší citlivosti na proudění vzduchu. Nejčastěji se tento plyn používá k redukcí použití při svařování vysokoreaktivních kovů, jako jsou titan, tantal, zirkon nebo molybden. Je drahší než ostatních drahých kovů, jako je například hliník nebo měď.

Helium - je také jednoatomový inertní plyn bez barvy a zápachu, který má ovšem v kontrastu s argonem vysokou tepelnou vodivost a vysoký ionizační potenciál asi 24,6 eV, to má za následek opačné účinky na svařovací oblouk i svar. Helium je velmi lehký plyn s hustotou jen 0,178 kg/m³ to snižuje efektivitu ochrany svaru, proto se pro lepší ochranu doporučuje větší průtok plynu. Napětí v oblouku je vyšší než u argonu a díky tepelné vodivosti je přenos tepla v oblouku velmi vysoký a proto se využívá pro svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí jako je například hliník nebo měď.

Vodík - je molekulární plyn používaný pro svařování austenitických ocelí jako dezoxidovadlo pro zvýšení teploty oblouku. Stejně jako ostatní molekulové plyny i vodík zvyšuje tekutost lázně, snižuje přetavení housenky a zlepšuje průvar. Kvůli náchylnosti feritických a martenzitických ocelí k tvorbě trhlin, není pro jejich svařování použití vodíku vhodné.

Směs argonu a helia - spojují vhodné vlastnosti obou plynů. Při svařování podílu helia se zvyšuje tepelný výkon, což se pozitivně projevuje na tvaru a rozměrech svaru. Změnou poměru těchto prvků ve směsi lze docílit zlepšení požadovaných parametrů, například rychlosti svařování. Heliu bývá ve směsi až 10%.

Směs argonu s dusíkem - dusík se jako ochranný plyn používá nejčastěji. Je vhodný zejména pro austenitické materiály a zvyšuje odolnost proti korozi u duplexních materiálů. Je to dvouatomový plyn stejně jako vodík, což je další častěji využívaný ochranný plyn. Dusík má vysokou tepelnou vodivost a přenáší do svaru velkou energii. Ve směsi s argonem může být až 10%, většinou se jedná o směs vhodnou zejména k svařování železa.

3.3.2 Plazmové plyny

Argon - je nejčastěji používaný plazmový plyn a obvykle se používá jako plyn pro stabilizaci směsi vodíku, dusíku nebo helia, což zvyšuje jeho energii. Argon snadno tvoří plazmu a není agresivní vůči elektrodám a trysce.

Helium - se používá zejména jako druhotný plyn s argonem. Helium směs s argonem má dobré vlastnosti přenosu tepla a poskytuje vysoký stupeň citlivosti pro ovládání plazmového paprsku.

Vodík – se používá zejména jako druhotný plazmový plyn. Přidáním malé množství vodíku do jiných plazmových plynů se výrazně mění jejich vlastnosti a energetická hladina. Je tedy používán jako ovládací prvek pro nastavení plazmového napětí a energie. Používá se také jako antioxidant.

Dusík – je univerzální primární plyn. Používá se samostatně nebo smíšeně s vodíkem. Výhoda dusíku spočívá v netečnosti vůči většině materiálů kromě titanu. Jedná se o nejlevnější plazmový plyn.

3.4 Svařovací parametry

Základní parametry plazmového svařování jsou svařovací proud, rychlost toku plazmového plynu a svařovací rychlost.

- Svařovací proud ovlivňuje vlastnosti svarů: prostřednictvím výstupní teploty plazmy a teploty. Zvýšením napětí proudu se svar rozšíří jak na povrchu, tak v oblasti kořene svaru. Jestliže je svařovací proud vzhledem k ostatním parametrům (rychlost svařování, tloušťka materiálu) příliš vysoký, způsobuje přílišnou penetraci svarové lázně. Podobný účinek může mít i příliš nízký svařovací proud. Podobné vlivy na svařovací proces má i tlak a průtok plazmového plynu, je tedy zapotřebí tyto dva parametry sladit tak, aby byl dosažen požadovaný ospoj.
- Rychlost toku plazmového plynu souvisí s kinetickou energií oblouku a týká se také hloubky penetrace. U černých roztavců tloušťkou materiálu nebo rychlostí svařování se zvyšuje i rychlost toku plazmového plynu. Rychlost toku plazmového plynu se obvykle pohybuje v rozmezí 1 až 3,5 litrů za minutu podle druhu a tloušťky materiálu.
- Svařovací rychlost určujeme obvykle v poměrně úzkém rozpětí. Toto rozpětí svařovací rychlosti závisí na dalších parametrech svařování. Při volbě příliš vysoké rychlosti dochází k vysoké penetraci, to ovšem nelze kompenzovat zesílením proudu nebo použitím plynu s vyšší tepelnou vodivostí.

Kromě těchto hlavních parametrů plazmového svařování mají v praxi na svařování vliv i další parametry jako například složení plazmového a ochranného plynu, napětí oblouku, rychlost posuvu svařovacího drátu, konstrukce hořáku, příprava drážky nebo čistota materiálu.

Způsoby plazmového svařování:

- Svařování klíčovou dírkou – metoda použitá v experimentu
- Mikroplazmové svařování
- Systém plazma–MIG
- Svařování „soft“ plazmou

4. Parametrické zkoušky – optimalizace svarového spoje [21][28][29]

Při optimalizaci parametrů svařovacího procesu je nutné dosáhnout v oblasti kořene svaru plynulého napojení svarového kovu na základní materiál. Tím lze vyloučit výskyt možného kritického místa se špičkou napětí, kde by mohlo dojít k rozvoji trhliny.

Zkušební svary byly zhotoveny bez použití prídavného materiálu. Svařovaný materiál byla žárupevná ocel 30CrMoNiV5-11 tloušťky 6 mm. Z hlediska optimálního provedení kořene svaru byly zkoušeny tři varianty úprav svarové hrany. První varianta tvaru „I“ bez úpravy hrany zkosněním, druhá varianta tvaru „I“ s úpravou kořene svaru zkosněním 45° do hloubky 0,5 mm a třetí varianta tvaru „I“ s úpravou kořene svaru zkosněním 30° do hloubky 0,7 mm. U všech vzorků byla mezi svařovanými materiály ponechána mezera 0,1 mm.

Parametrické zkoušky svařování kořene svaru rotoru turbíny plazmou byly provedeny ve firmě SIEMENS Industrial Turbomachinery s.r.o. v Brně za řízení EUTRONIC GAP 3000 a vyhodnocení proběhlo na VUT FSI v Brně. Příprava a vlastní průběh svařování na obr. č. 4.1 a 4.2.



Obr. č. 4.1 Příprava vzorků k svařování PAW



Obr. č. 4.2 Vlastní svařování

4.1 Svařovací řízení

Zařízení EUTRONIC GAP 3000- výrobce firma Castolin S.A., Švýcarsko



Parametry zařízení:

Intenzita pilotního proudu.....5–100A
Intenzita svařovacího proudu.....5–300AAC
Intenzita svařovacího proudu.....3–300ADC
Napětí naprázdno.....56V
Použitý plazmový ochranný plyn Ar+7,5% H₂

Zařízení je vhodné pro:

- svařování plazmovým paprskem key-hole
- navařování plazmou práškem
- svařování plazmovým paprskem studeným drátem
- TIG svařování
- TIG svařování studeným drátem.

Obr. č. 4.3 Eutronic gap 3000 [21]

Hořák ABI PLAST WELD 100W – výrobce firma Alexander Binzel

Kapalinou chlazený, dorychlostisvařování 1,5m/min, průměr dízy 0,8–3,6mm.

Intenzita svařovacího proudu.....5–100A

Doporučené parametry pro svařování:

průměr trysky 1,2mm, průměr wolframové elektrody 1,6mm, sv. proud 25–35A, průtok plazmového plynu 0,2–0,5l/min

4.2 Hodnocení vzorků

Uprvní a druhá sada vzorků, bylna každá svařovaná vzorku zhotovena svařovací sjezdnicí souborem svařovacích parametrů. U třetí a čtvrté sady bylo na jednom vzorku svařováno více dílů svařovacími parametry.

4.2.1 První sada svařování

Vzorky stupňů svařovacího tvaru „I“ bez úprav spodní hrany. Použitá teplota přehřevu u vybraných vzorků v rozmezí 220 až 360 °C dle tab. 1. U vzorků č. 1–7 byla konstantní vzdálenost trysky od povrchu materiálu 5mm. U vzorku č. 5 byla realizována ochrana kořene svaru argonem čistoty 5.0 při průtoku 10l.min⁻¹ a u vzorků č. 6 a 7 při průtoku 7l.min⁻¹.

Tab. 8

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota (°C)
1	48,5	34	0,06	0,8	1,4	10	360
2	48,5	34	0,06	0,8	1,4	10	220
3	37,5	35	0,06	0,8	1,5	10	300
4	50,5	35	0,06	0,8	1,3	10	-

5	48,5	34	0,06	0,8	1,35	11	-
6	48,7	34	0,06	0,8	1,35	11	330
7	48,7	34	0,05	0,8	1,35	11	-

Hodnocení:

vzorek povrch

1 propadlý 1 mm

2 mírn

3 mírn

4 mírn

5 rovinný 0,2 mm

6 mírn

7 propadlý 1 mm

ko

rovinný p

nerovnom

rovinný

0,4 mm

0,4 mm

0,5 mm

0,8 mm

výrazn

řen

řevýšený 2 mm

řevýšený 0,3 mm

řevýšený 1,5 mm

řevýšený 2,3 mm

řevýšený 1,0 mm

řevýšený 2,3 mm

řevýšený 2,4 mm

4.2.2 Druh a sada svarů

Vzorky stupným svařem tvaru „I“ bez úpravy spodní hrany. Ve druhé sadě vzorků svařování plazmou byl proveden p ředehřev v rozmezí 270 až 370 °C u vybraných svarů dle tabulky 2. U vzorků č. 11 – 33 byla vzdálenost trysky od povrchu materiálu 5 až 6 mm a plynová ochrana kořene argonem je u vzorků v kombinaci s případnou teplotou p ředehřevu uvedená v tabulce 2.

Tab.9

vzorek číslo	svařovací proud I (A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota (°C)/plynko řen (l/min)
11	47,2	35	0,05	0,8	1,55	12	-/10
12	47,2	34	0,05	0,8	1,55	12	-
13	47,2	35	0,05	0,8	1,4	11	380/15
14	47	33	0,05	0,8	1,4	11	295/-
15	47	33	0,05	0,8	1,4	11	-
16	47,4	34	0,06	0,8	1,4	11	-
17	45,4	34	0,06	nová 0,8	1,4	11	-
18	45,4	34	0,06	0,8	1,4	11	300/-
19	46,8	38,4	0,06	0,8	1,4	11	-
20	47,1	38,4	0,06	0,8	1,4	11	340/20
21	47,1	40	0,06	0,8	1,4	11	270/17
22	47,1	39	0,06	0,8	1,4	11	-/17
23	47,1	39,2	0,06	0,8	1,4	11	-/17
24	47,1	39,2	0,06	0,8	1,4	11	-/17
25	47,1	39,4	0,06	0,8	1,4	11	260/-
26	47,2	39,4	0,07	0,8	1,4	11	-/24

27	48	39	0,07	0,8	1,4	11	370/35
28	47,5	37	0,07	0,8	1,4	11	-
29	47	38	0,06	0,8	1,4	11	-
30	47	39	0,06	0,8	1,7	11	-/20
31	47	39	0,06	0,8	1,2	11	-
32	47	39	0,06	0,8	1,45	11	-/22
33	47,1	39	0,06	0,8	1,48	11	-/22

Hodnocení:

vzorek povrch

	ko	řen
11 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,2 mm p	řerušovaný p řevýšený 2,2 mm
12 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,3 mm zvln	ěrný p řevýšený 2,0 mm
13 rovnom	ěrný propadlý 0,9 mm nerovnom	ěrný p řevýšený 1,7 mm
14 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,5 mm nerovnom	ěrný p řevýšený 2,3 mm
15 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,3 mm rovinný	p řevýšený 2,1 mm
16 rovnom	ěrný propadlý 0,8 mm nepravidel	ný p řevýšený 2,8 mm
17 rovnom	ěrný mírně propadlý 1,1 mm	částečně neprova řený p řevýšený 1,0 mm
18 rovinný	neprova	řený
19 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,8 mm rovinný	p řevýšený 0,9 mm
20 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,2 mm rovinný	p řevýšený 0,7 mm
21 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,9 mm nerovnom	ěrný p řevýšený 2,1 mm
22 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,4 mm mimosvar p	řevýšený 1,0 mm
23 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,3 mm rovinný	p řevýšený 0,8 mm
24 propadlý	0,9 mm nerovnom	ěrný p řevýšený 1,5 mm
25 rovinný	0,1 mm rovinný p	řevýšený 0,7 mm
26 rovinný	0,2 mm nerovnom	ěrný p řevýšený 0,7 mm
27 mírn	ěpropadlý 0,3 mm mí	rně zvlněný p řevýšení 1,6 mm
28 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,4 mm nerovnom	ěrný p řevýšený 1,3 mm
29 propadlý	1,3 mm nepravidelný p	řevýšený 2,4 mm
30 rovnom	ěrný mírně propadlý 1,2 mm nepravidelný p	řevýšený 2,5 mm
31 rovnom	ěrný mírně propadlý 0,3 mm 1/2 neprova	řen p řevýšený 1,8 mm
32 mírn	ěpropadlý 0,7 mm zv	lněný p řevýšený 0,7 mm
33 rovinný	0,3 mm zvln	ěrný p řevýšený 0,6 mm

4.2.3 Třetísada svařů

Ve třetí sadě vzorků svařování plazmou byl proveden p ředehřev v rozmezí 330 až 360°C všech svařů. U vzorků č. 1–22 byla vzdálenost trysky od povrchu materiálu 4 mm a kořenová ochrana argonem oprůtok 3 l.min⁻¹.

Tab.10

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota (°C)
1	48,5	35,5	0,06	0,8	1,5	12	360
2	49	33	0,06	0,8	1,5	12	350

Hodnocení:**vzorek povrch**

1propadlý1mm
2propadlý1,2mm

ko

nerovnom
nerovnom

řen

ěrný,p řevýšený2mm
ěrný,p řevýšený2,5mm

Tab.11

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
3	49	33	0,06	0,8	1,5	12	350
4	48,8	32,5	0,06	0,8	1,5	12	350
5	48,7	34,9	0,06	0,8	1,4	12	365

Hodnocení:**vzorek povrch**

3propadlý1mm
4propadlý1,2mm
5propadlý1mm

ko

nerovnom
rovinnýp
nepravidelnýp

řen

ěrnýp řevýšený2mm
řevýšený2,5mm
řevýšený2mm

Tab.12

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
6	47,5	33	0,06	0,8	1,4	12	350
7	47,5	33	0,06	0,8	1,4	10	330-360
8	47,5	34,5	0,06	0,8	1,4	9	330-360
9	47,5	34,9	0,06	0,8	1,4	8	330-360
10	47,5	34,6	0,06	0,8	1,4	7	330-360

Hodnocení:**vzorek povrch**

6rovnom ěrnýmírn ěpropadlý0,8mmnerovnom
7rovnom ěrnýmírn ěpropadlý1mmnepravidelný
8rovnom ěrnýmírn ěpropadlý1,2mmnepravidelný
9rovnom ěrnýmírn ěpropadlý1,2mmnerovnom
10rovnom ěrnýpropadlý1,5mmrovin

ko**řen**

ěrnýp řevýšený1,5mm
p řevýšený2,4mm
převýšený2,2mm
ěrnýp řevýšený2,1mm
nýp řevýšený2,3mm

Tab.13

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
11	47,5	33,5	0,06	0,8	1,4	10	330-360
12	46	34,3	0,06	0,8	1,4	10	330-360
13	45	34,1	0,06	0,8	1,4	10	330-360
14	44	34,1	0,06	0,8	1,4	10	330-360

15	43	34	0,06	0,8	1,4	10	330-360
16	42	33,8	0,06	0,8	1,4	10	330-360
17	41	33,5	0,06	0,8	1,4	10	330-360

Hodnocení:

vzorek	povrch	ko	řen
11	rovnom	ěrnýpropadlý1,2mmnero	vnoměrnýp řevýšený1,5mm
12	rovnom	ěrnýpropadlý1,3mmnepr	avidelnýp řevýšený2,4mm
13	rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,9mmnepravidelný	p řevýšený2,2mm
14	rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,8mmnerovnom	ěrnýp řevýšený2,1mm
15	rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,9mmrovinnýp	řevýšený2,3mm
16	rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,8mmnepravidelný	převýšený1,8mm
17	rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý1,1mm	částečněneprova řený

Tab.14

vzorek číslo	svařovací prouI(A)	svařovací napětíU (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
18	45	33,4	0,06	0,8	1,4	10	330-360
19	45	34	0,06	0,8	1,25	10	330-360
20	45	34,1	0,06	0,8	1,45	10	330-360
21	45	34,1	0,06	0,8	1,48	10	330-360
22	45	34,7	0,06	0,8	1,61	10	330-360

Hodnocení:

vzorek	povrch	ko	řen
18	rovinný	neprova	řený
19	rovinný	neprova	řený
20	rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,9mmnepravidelnýp	řevýšený2,0mm
21	rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,9mmrovinnýp	řevýšený1,8mm
22	rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,5mmvýrazn	ězvřásn ělýp řevýš.2,3mm

Uvzork ů č.23–27tab.8bylavzdálenosttryskyodpovrchu materiálu6mmako řenová ochranaargonemopr ůtoku3l.min⁻¹.Spodnířhranap řípravysvarovéhospojezkosená1x45°

Tab.15

vzorek číslo	svařovací prouI(A)	svařovací napětíU (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
23	45	35,6	0,06	0,8	1,3-1,6 konec1,4	10	330-360
24	45	35,8	0,06	0,8	1,39	10	330-360
25	45,5	35,5	0,06	0,8	1,39	10	330-360
26	45,5	35,8	0,05	0,8	1,39	10	330-360
27	46	35,5	0,05	0,8	1,38	10	330-360

Hodnocení:

vzorek	povrch	ko	řen
23rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,3mm	neprovadělnýp	řevýšeny1,5mm
24rovinný		neprova	řený
24rovinný		neprova	řený
25rovinný		neprova	řený
26rovinný		neprova	řený
27mírn	ěpropadlý0,3mm	p řevýšení1,6mm	

Uvzork ů ě.28–41bylavzdálenosttryskyodpovrchumateriá lu5mmako řenováochrana argonemopr ůtoku3l.min⁻¹

Tab.16

vzorek číslo	svařovací prouI(A)	svařovací napětíU (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
28	45	33,5	0,06	0,8	1,4	10	330-360
29	46	33,5	0,06	0,8	1,4	10	330-360
30	47	34,1	0,06	0,8	1,4	10	330-360
31	48	34,3	0,06	0,8	1,4	10	330-360
32	49	34,8	0,06	0,8	1,4	10	330-360

Hodnocení:

vzorek	povrch	ko	řen
28rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý1,0mm	nerovnom	ěrnýp řevýšeny1,5mm
29rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,8mm	neprovadělnýp	řevýšeny1,8mm
30rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý0,7mm	neprovadělnýp	řevýšeny2,5mm
31rovnom	ěrnýmírn ěpropadlý1,0mm	nerovnom	ěrnýp řevýšeny2,0mm
32rovnom	ěrnývýrazn ěpropadlý2,3mm	mírn ěneprova řenýap	řevýšeny2,3mm

Tab.17

vzorek číslo	svařovací prouI(A)	svařovací napětíU (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
38	45	34,5	0,06	0,8	1,35	10	330-360
39	45	34,5	0,06	0,8	1,5	10	330-360
40	48	34,5	0,06	0,8	1,5	10	330-360
41	48	34	0,06	0,8	1,5	8	330-360

Hodnocení:

vzorek	povrch	ko	řen
38rovinný		neprova	řený
39rovinný		neprova	řený
40rovinný		neprova	řený
41rovinný		neprova	řený

4.2.4 Čtvrtásadasvar ů

Uvšechvzork ů bylprovedenp ředehřevvrozmezí250až360°C.Uvzork ů č.50-51 bylavzdálenosttryskyodpovrchumateriálu4mma ko řenováochranaargonemopr ů toku3 l.min⁻¹.

Tab.18

vzorek číslo	svařovací proudI(A)	svařovací napětíU (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
50	48	zm ěny	0,06	0,8	zm ěny	zm ěny	330-360

Hodnocení:

vzorekpovrch

ko

řen

50rovnom ěrnýmírn ěpropadlý0,9mmnerovnom ěrnýp řevýšený2,1mm

Uvzork ů č.52-57bylavzdálenosttryskyodpovrchumateriá lu5mmako řenováochrana argonemopr ů toku3l.min⁻¹

Tab.19

vzorek číslo	svařovací proudI(A)	svařovací napětíU (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
51	48	zm ěny	0,06	0,8	zm ěny	zm ěny	370
52	48	38	0,06	nová0,8	1,63	7,3	330-360
53	48	38	0,05	0,8	1,63	7,3	330

Hodnocení:

vzorekpovrch

ko

řen

51rovnom ěrnýpropadlý1,3mmnerovnom ěrnýp řevýšený1,9mm

52rovnom ěrnýpropadlý1,3mmnerovnom ěrnýp řevýšený1,9mm

53rovnom ěrnýpropadlý1,5mmnerovnom ěrnýp řevýšený1,7mm

Tab.20

vzorek číslo	svařovací proudI(A)	svařovací napětíU (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
54	48	38	0,05	0,8	1,63	7,3	300-360
55	47,7	38	0,05	0,8	1,63	7,3	300-360
56	40,2	38	0,05	0,8	1,63	7,3	300-360

Hodnocení:

vzorekpovrch

ko

řen

54rovnom ěrnýpropadlý1,2mmnerovnom ěrnýp řevýšený2,1mm

55rovinný neprova řený

56rovinný neprova řený

Uvzorku č.58bylavzdálenosttryskyodpovrchumateriálu6 mmako řenováochrana argonemopr ů toku3l.min⁻¹

Tab.21

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
57	48	35,5	0,06	nová 0,8	1,5	8	300-360
58	48	35,5	0,06	nová 0,8	1,4	8	300-360

Hodnocení:**vzorek povrch**

57 rovinný

58 rovnom

U vzorků č. 59-70 byla vzdálenost trysky od povrchu materiálu argonemoprůtok 3 l.min⁻¹**ko**

neprova

ěrný propadlý 1,6 mm rovinný

řen

řený

p řevýšený 1,3 mm

lu 5 mm a ko řenová ochrana

Tab.22

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
59	47,5	36,5	0,06	0,8	1,35	8	300-360
60	47,3	36,5	0,06	0,8	1,35	8	300-360
61	47	37,2	0,06	0,8	1,35	8	300-360

Hodnocení:**vzorek povrch**

59 rovnom

60 rovnom

61 rovnom

ěrný propadlý 1,2 mm nepravi

ěrný propadlý 1 mm neprav

ěrný mírně propadlý 0,8 mm nepravidelný

ko**řen**

delný

idelný

řevýšený 1,9 mm

řevýšený 2,1 mm

řevýšený 1,2 mm

Tab.23

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
62	47,1	38,4	0,06	0,8	1,35	8	300-360
63	47,1	38,4	0,06	0,8	1,35	8	300-360
64	47,3	38,4	0,06	0,8	1,35	8	300-360
65	47,3	38,4	0,05	0,8	1,35	8	300-360

Hodnocení:**vzorek povrch**

62 rovnom

63 rovnom

64 rovnom

65 rovnom

ěrný mírně propadlý 0,9 mm nerovnom

ěrný mírně propadlý 0,2 mm neprova

ěrný mírně propadlý 0,2 mm neprova

ěrný mírně propadlý 0,4 mm nerovnom

ko**řen**

ěrný

řený

řený

ěrný

řevýšený 1,7 mm

řevýšený 1,8 mm

Tab.24

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
66	47,3	37,2	0,05	0,8	1,38	8	250-350
67	47,3	37,2	0,05	0,8	1,38	8	250-350

Hodnocení:**vzorek povrch**

66 rovinný

67 rovinný

ko

neprova

neprova

řen

řený

řený

Tab.25

vzorek číslo	svařovací proud I(A)	svařovací napětí U (V)	posuv (m/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota(°C)
68	47,3	35	0,06	0,8	1,36	8	290
69	48	35	0,06	0,8	1,36	8	250-350
70	48	35	0,06	0,8	1,5	0,7	250-350

Hodnocení:**vzorek povrch**

68 rovnom

69 rovnom

70 rovnom

ko

ěrnýmírn ěpropadlý0,1mmneprova

ěrnýmírn ěpropadlý0,5mm

ěrnýmírn ěpropadlý0,6mmnepravidelnýp

řen

řený

částečněneprova řený

řevýšený1,5mm

4.3 Ocel 30CrMoNiV5-11

Dodavatel materiálu Žďa.s.s.tavba č.38038 protokol 10859/2009. Inspekční certifikát EN 10204 3.1, protokol o mechanických zkouškách a chemický rozbor provedený firmou Žďa.s.s.vp říloze č.1. Chemické složení a základní mechanické vlastnosti tab.26 a 27.

C[%]	Mn[%]	S[%]	Mo[%]	V[%]	Si[%]	P[%]
0.27-0.31	0.3-0.8	0.007max	1.0-1.2	0.25-0.35	0.1max	0.007max
Cr[%]	Ni[%]	Al[%]	As[%]	Sb[%]	Sn[%]	Cu[%]
1.1-1.4	0.50-0.75	0.01max	0.02max	0.0015max	0.01max	0.12max

Tab. č.26 Chemické složení

Rp0,2[MPa]	Rm[MPa]	A5[%]	Z[%]
min550	700-850	40	20

Tab. č.27 Mechanické vlastnosti při 20°C

4.4 Výpočet optimálního teploty ředehřevu

Výpočet proveden dle normy - ČSN EN 1011-2 Svařování. Doporučení pro svařování kovových materiálů. Část 2 - Obloukové svařování feritických ocelí. Materiál 30CrMoNiV 5-11 vlastností chemického složení dle kapitoly 4.3.

Výpočet uhlíkového ekvivalentu CET:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} = 0,31 + \frac{1,2 + 0,8}{10} + \frac{1,4 + 0,12}{20} + \frac{0,75}{40} = 0,604 \quad (6)$$

Výpočet teploty ředehřevu dle vzorce (4) nebo dle normy ČSN EN 1011-2:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh \frac{d}{35} + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q_s - 328 \quad (7)$$

...tloušťka materiálu $d = 6 \text{ mm}$

...úroveň difúzního vodíku $HD = 4 \text{ ml/100g}$

Tepelný příkon Q_s :

$$Q_s = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{v_s} \quad (8)$$

pro nejnižší parametry svařování: $U = 32,5 \text{ V}$; $I = 41 \text{ A}$ a $v_s = 0,07 \text{ m/min}$

$Q_{s\min} = 0,685 \text{ kJ/mm}$

pro nejvyšší parametry svařování: $U = 40 \text{ V}$; $I = 50,5 \text{ A}$ a $v_s = 0,05 \text{ m/min}$

$Q_{s\max} = 1,460 \text{ kJ/mm}$

Teplota ředehřevu pro $Q_{s\min}$ a $Q_{s\max}$ dle vzorce (7) je $T_{p\min} = 220,87^\circ \text{C}$ a $T_{p\max} = 220,88^\circ \text{C}$.

Doporučená teplota ředehřevu je tedy minimálně 221°C , to je zároveň dostatečně vysoká teplota vzhledem k difúzi vodíku.

4.5 Hodnocení povrchu optimálních vzorků

Vzorky byly hodnoceny z rozměrového hlediska a z hlediska kvality povrchu svaru. Hodnocení rozměrů svaru vychází z normy ČSN EN ISO 5817 Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality. Posuzujeme zejména vadu č. 504 – nadměrné převýšení křene. Vztah maximální výšky šířky křene následující:

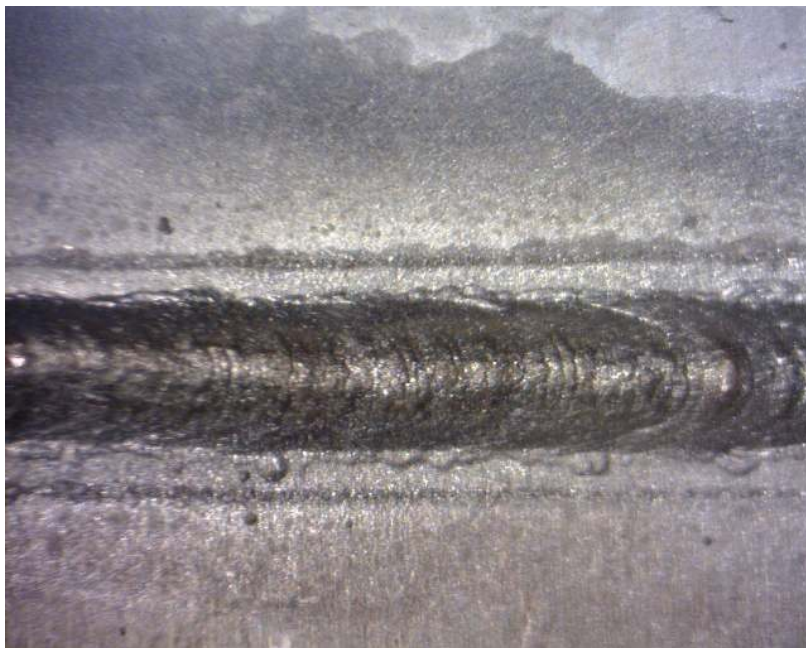
$$h \leq 1 \text{ mm} + 0,2b \quad (9)$$

kde h je výška křene svaru
a b je šířka křene svaru

Podle vztahu (9) vychází například pro šířku křene 4 mm maximální výška $1,8 \text{ mm}$ a pro šířku 3 mm výška $1,6 \text{ mm}$. Z toho tohle hledisko vyhovuje normě celá řada zkušebních svarů. Další hlediska hodnocení jsou rovinnost a čistota řemesvaru nebo poréznost mezisvarem a základním materiálem, který musí být pozvolný. Při ostrém přechodu hrozí vznik špičkové napětí a následná iniciace trhliny.

Všech zmíněných kritérií hodnocení nejlépe vyhovují svary číslo 23, 25 obr. č. 4.4 a z obr. 4.7 a z obr. 4.8 a 4.9. Na fotografiích svarů obr. 4.4 a 4.6 jsou křeny

rovinné, spříznivým přechodem svaru a základního materiálu, ovšem smírně u oxidací a u svaru na obr. č.4.8 jako řensostrým přechodem, ale bez oxidace. Svary mají mírně propadlý povrch, což vzhledem k následnému svařování dalších vrstev metodou SAW nevadí.



*Obr.č.4.4 Kořensvar vz.23, druhá sada. Povrch jemně oxidovaný
Příznivý přechod mezi svarovým kovem a základním materiálem.*



*Obr. č.4.5 Povrch svarové housenky vz.23, druhá sada..
Velmi mírně propadlý povrch, zoxidován.*



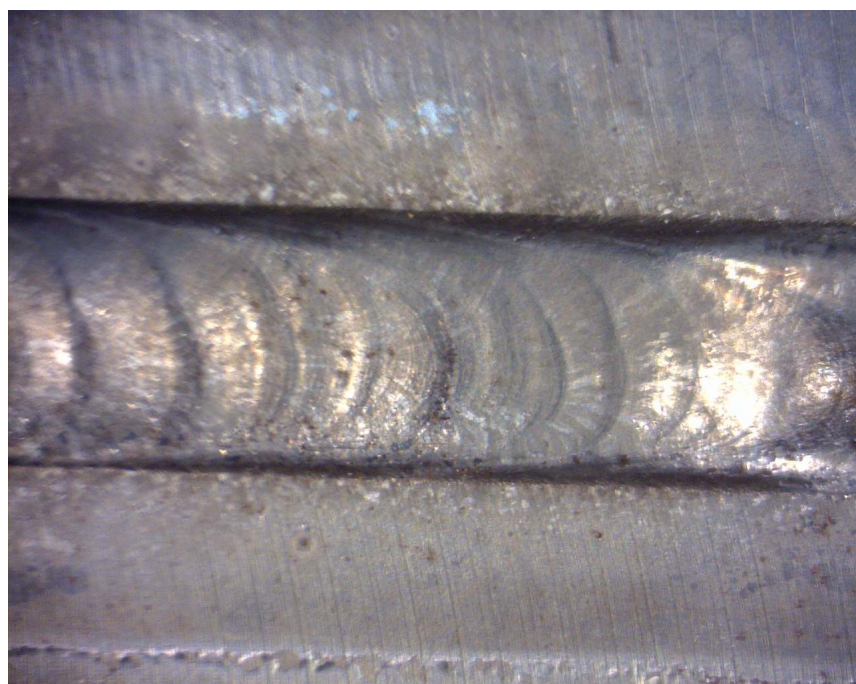
*Obr. č.4.6 Kořensvarů vž.25, druhá sada. Povrch jemně oxidovaný
Jemná kresba svarové housenky. Přiznivý přechod mezi svarovým kovem
a základním materiálem.*



*Obr.č.4.7 Povrch svarové housenky vž.25, druhá sada..
Částečně propadlý povrch, oxidace mírná.*



*Obr. č.4.8 Ko řenneza řazeného svaru. Povrch jetém ěř bez oxidace.
Ostrý přechod mezi svarovým kovem a základním materiálem.*



*Obr. č.4.9 Povrch svarového housenkyneza řazeného svaru.
Mírně propadlý povrch, bez oxidace.*

4.6M ěřenímikrotvrđostiHV1

Na vybraných vzorcích č. 2, 5 a 27 zprvní zkušební sady bylo provedeno m ěření mikrotvrđosti podle Vickerse HV1. Tyto vzorky byly vybrány kv ůli podobnosti sva řovacích parametrů a naopak rozdílnosti teplot p ředehřevů. Kv ůli rozdílným teplotám p ředehřevů byly předpokládány rozdíly tvrdostí tepeln ě ovlivn ěné zón ě TOO.

Parametry sva řování vzork ů:

Svařovací proud: $I=48,5\text{A}$,

Rychlost sva řování $v_s=0,06\text{m/min}$,

Průměr trysky $0,8\text{mm}$

Průtok plazmového plynu $1,4\text{l/min}$

Průtok ochranného plynu 1l/min ,

Rozdílné byly teploty p ředehřevu: vz. č. 02: $T_p=220^\circ\text{C}$

05: bez p ředehřevu,

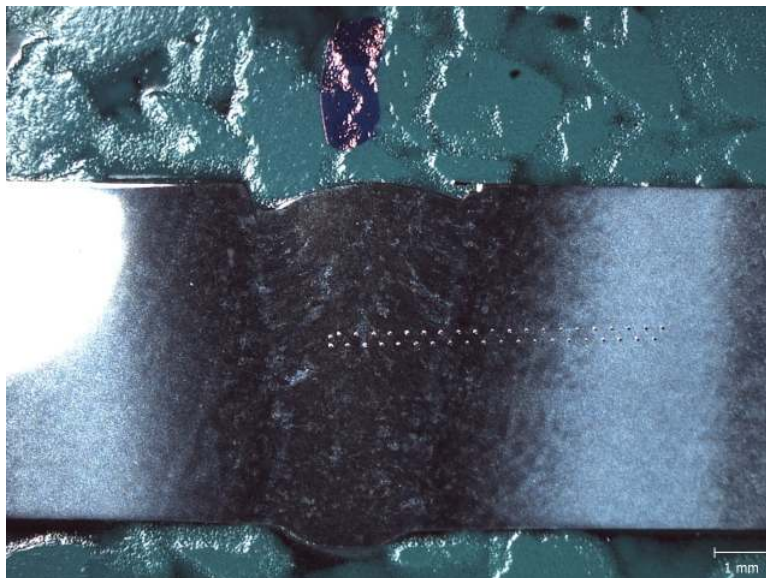
27: $T_p=370^\circ\text{C}$.

Popis:

Tepeln ě ovlivn ěná oblast (TOO) všech t ří vzork ů je co do struktury a nam ěřené tvrdosti rozdělena na dv ě pásma. První pásmo (TOO 1), p řiléhající ke svařovému kovu má vyšší tvrdost, druhé (TOO 2) na stran ě tepeln ě neovlivn ěného základního materiálu má tvrdost podstatn ě nižší.

Mikrotvrđost vzorku č.2

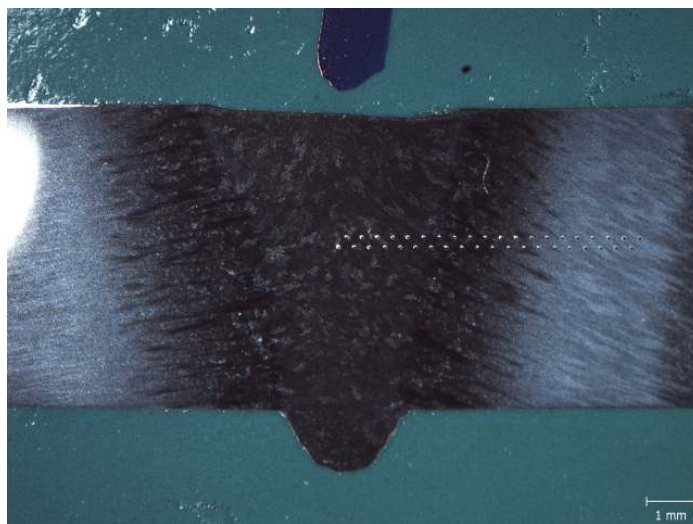
Protokol m ěření vp říloze č. 2. U tohoto vzorku byla nam ěřena pom ěrn ě vysoká tvrdost svařového kovu. Ten se vyzna ěuje hrubší dendritickou strukturou sdendrity stáčejícími se k povrchu housenky, což odpovídá sva řování sp ředehřevem a pomalému chladnutí. Tak ě velká ší řka TOO (5mm) odpovídá tomuto režimu odvodu tepla. T ě TOO1 (tmavší pásmo) se nachází od vzdálenosti 2,5 do cca 4,5 mm a na stran ě svařového kovu i na stran ě TOO2 (sv ětl ější pásmo) ohrani ěenavýrazným zvýšením mikrotvrđosti – 564 resp. 494 HV1. Mikrotvrđost TOO2 je podstatn ě nižší, než mikrotvrđost SK a TOO1 (vesm ěš pod 300 HV1).



Obr. č. 4.10 Makrostruktura vzorku 2

Mikrotvrdost vzorku č.5

Protokol měření v příloze č. 3. V porovnání s předchozím svařem má svařový kov nižší tvrdost, od 350 do 390 HV1 (vzdálenost 0 až 2,2 mm). Také struktura je jemnější a celá TOO asi o 0,5 mm užší. Jezdecký řez má zřetelný poměr velikosti TOO2 na úkor TOO1. Pásmo TOO1 (vzdálenost 2,2 až 3,7 mm) není ohraničeno tak výraznými špičkami tvrdosti a jeho průměrná mikrotvrdost je také menší, jsou zde však výraznější rozdíly mezi hodnotami tvrdosti jednotlivých vpichů. Z toho je možné usuzovat na rozdíl tvrdosti jednotlivých zrn v tomto pásmu. Mikrotvrdost TOO postupně klesá se vzdáleností od osy svaru. Obě pásma mají výraznější směrnost struktury směrem od vodiče tepla.



Obr. č. 4.11 Makrostruktura vzorku 5

Mikrotvrdost vzorku č. 27

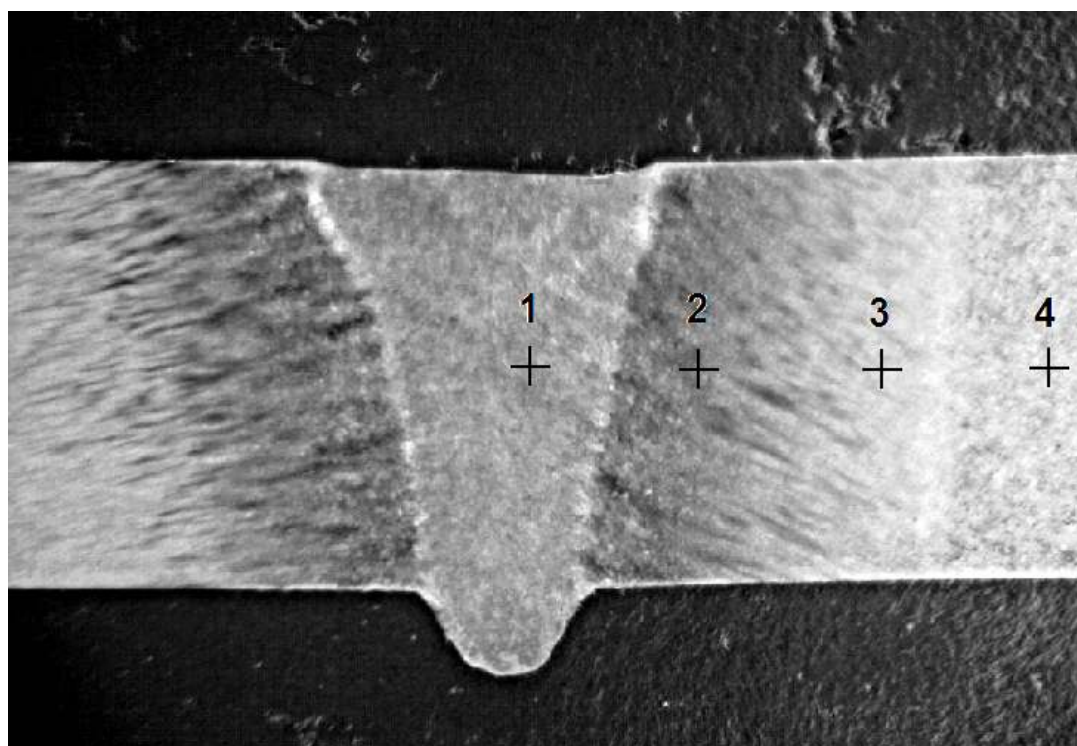
Protokol měření v příloze č. 4, v protokolu je chybně uvedeno číslo vzorku 23. Vzhledem k jinému směru vedení přímkového měření mikrotvrdosti, jsou uvedené vzdálenosti oproti předchozím vzorkům zkreslené. Celková šířka TOO je asi 5,5 mm a odpovídá teplotě předehřevu. Svařový kov vykazuje stejnou mikrotvrdost, jako předchozí vzorek (05) svařovaný bez předehřevu. Také hodnoty naměřené v TOO1 se více blíží vzorku 05 než vzorku 02, svařovaného s předehřevem 220 °C. V TOO2 mikrotvrdost postupně srostoucí vzdáleností od hranice ztavení klesá.



Obr. č. 4.12 Makrostruktura vzorku 27

4.7 Mikrostruktura

U vzorku číslo 5 zprvní svařované sady, byla zhotoveného výbrusu vyhodnocena a struktura v několika místech. Na obrázku 4.13 jsou vyznačena jejich umístění na vzorku. Z fotografií v 10násobném a 40násobném zvětšení, byly určeny následující materiálové struktury. Ve svařovém kovu hrubý martenzit - obrázky 4.14 a 4.15. V celé tepelně ovlivněné oblasti se nachází martenzitická struktura, která je v oblasti přiléhající ke svařovému kovu TOO1 výrazně hrubší než v TOO2, tedy v oblasti přiléhající k základnímu materiálu. Hrubý martenzit v TOO1 na obrázku 4.16 a 4.17. Jemný martenzit v TOO2 na obrázku 4.18 a 4.19. Struktura základního materiálu je ferito-perliticko-bainitická, obrázek 4.20 a 4.21.



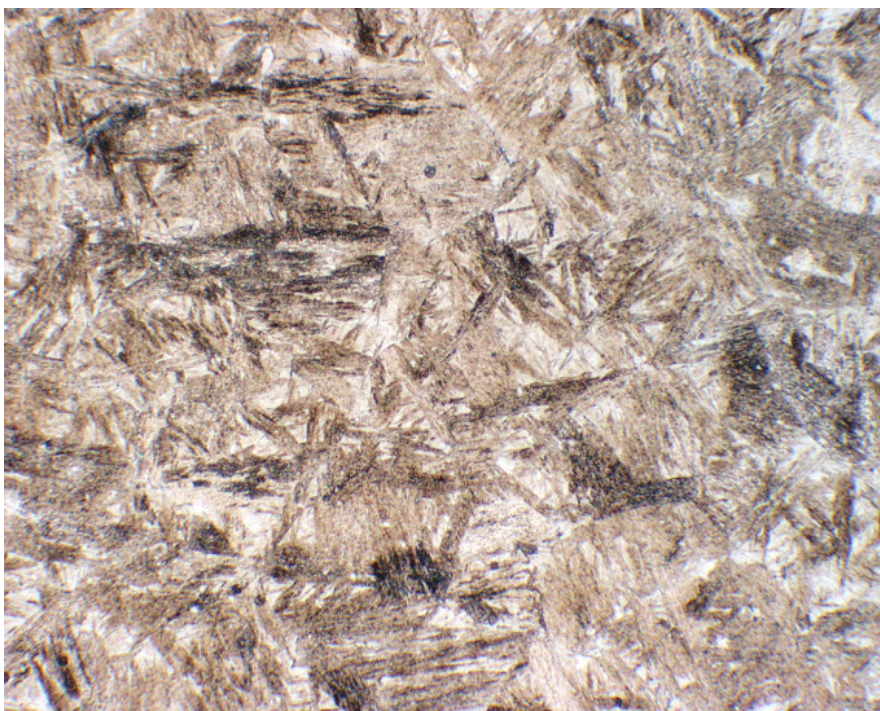
Obr. č. 4.13 Umístění vyhodnocovaných bodů

1 – svařový kov SK

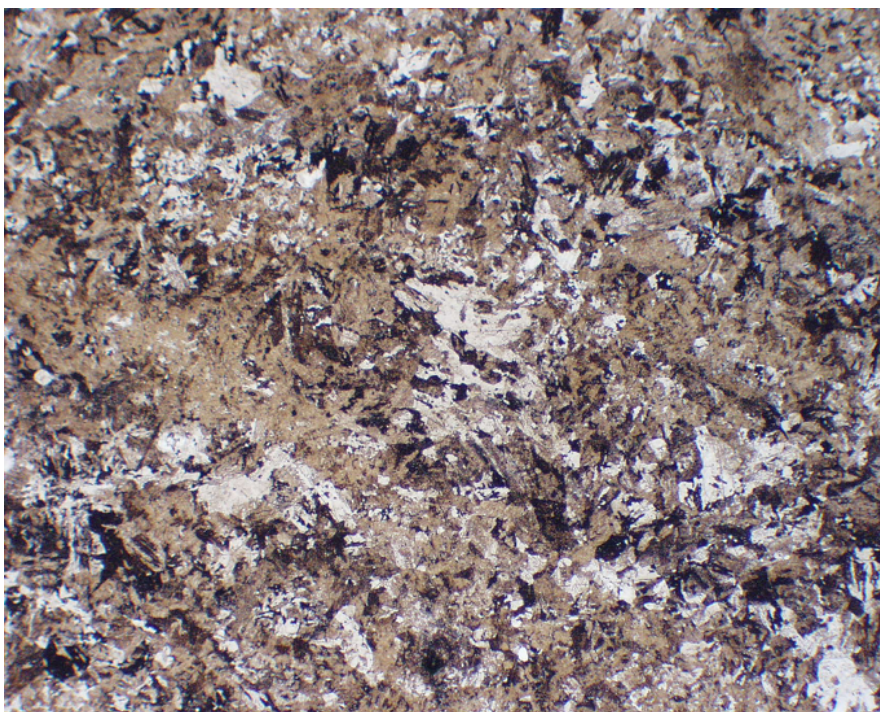
2 – tepelně ovlivněná oblast hrubá struktura TOO1

3 – tepelně ovlivněná oblast jemná struktura TOO2

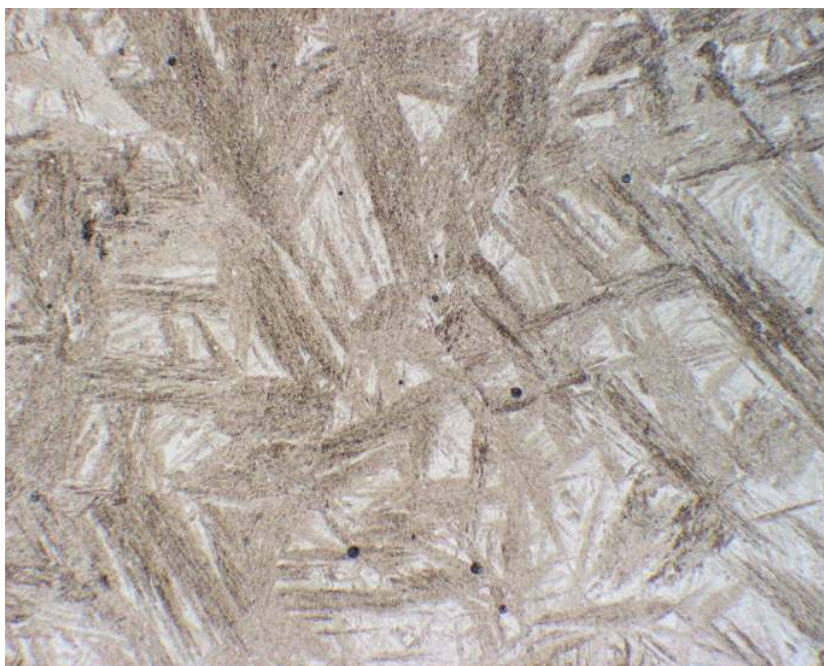
4 – základní materiál ZM



Obr. č.4.141–svarovýkovzr ětšení500x



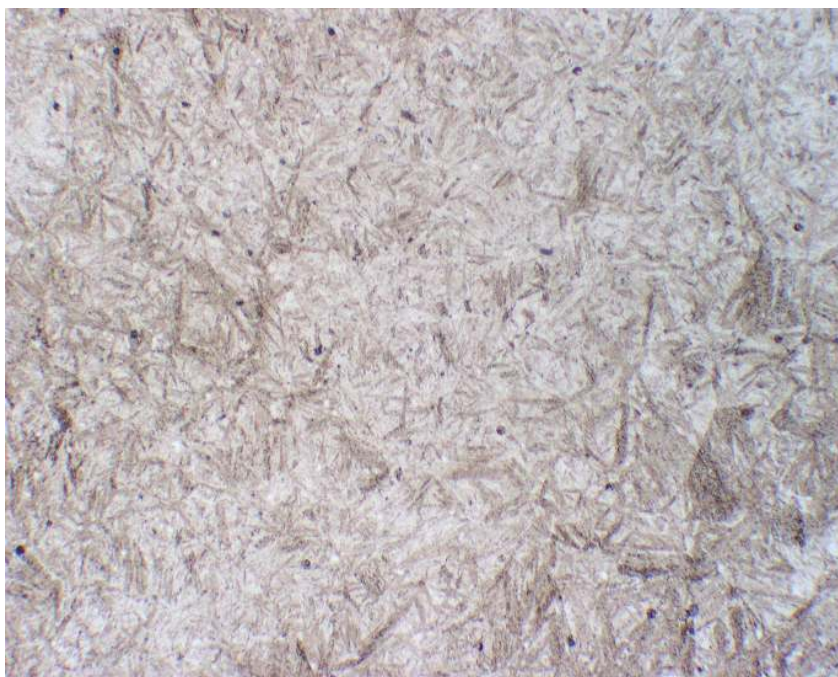
Obr. č.4.151–svarovýkovzr ětšení100x



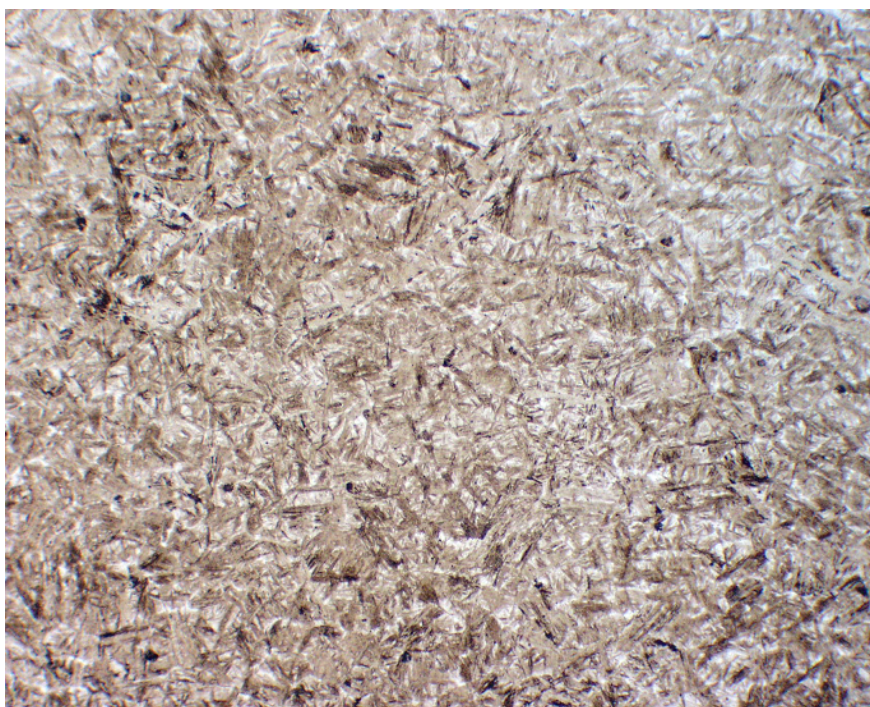
Obr. č.4.162–tepelně ovlivněná oblast hrubá struktura většení 500x



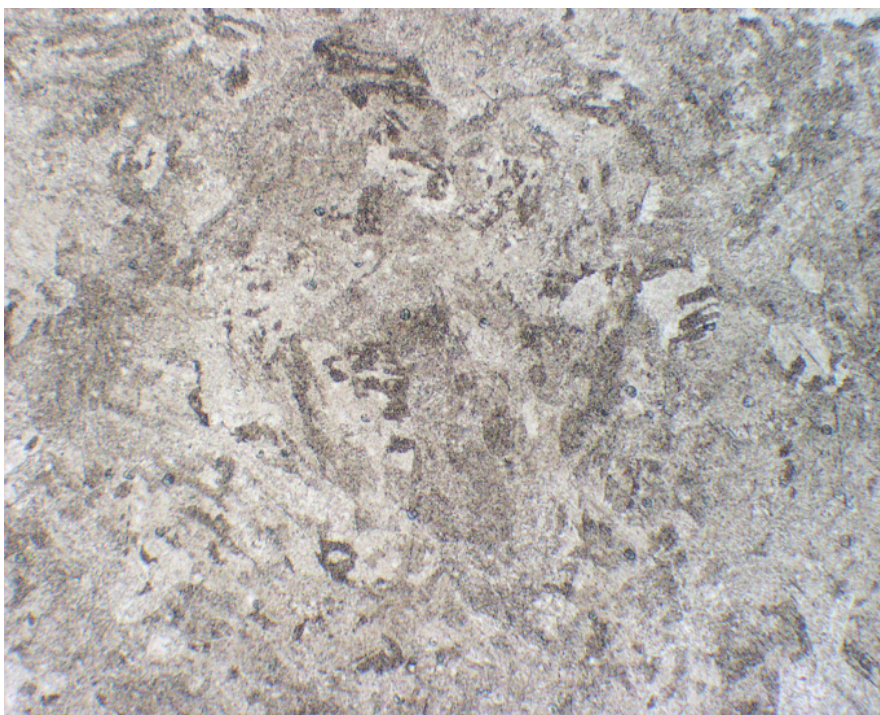
Obr. č.4.172–tepelně ovlivněná oblast hrubá struktura většení 100x



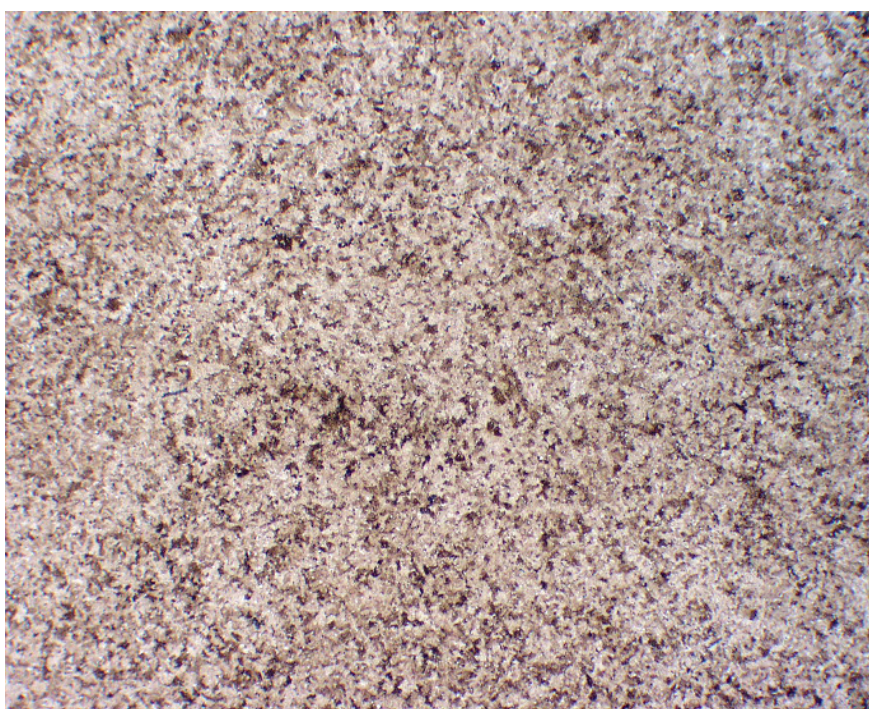
Obr. č.4.183–tepelně ovlivněná oblast jemná struktura v žetšení 500x



Obr. č.4.193–tepelně ovlivněná oblast jemná struktura v žetšení 100x



Obr. č.4.204—základnímateriálzv ěišení500x



Obr. č.4.214—základnímateriálzv ěišení100x

5. Zkoušky protavení osazení [6]

Na obrázku č. 1.2 v úvodu, jsou zobrazeny drážky, které umožňují snadnější a přesnější vzájemné ustavení obou svařovaných částí rotoru v úči sobě. Zatímco v průvodním svařovacím postupu svar přes toto osazení neprocházela a plnil tedy pouze pomocnou funkci pro vystředění rotoru, v nově navrhované metodě, budou tyto drážky provedeny plazmovým paprskem a vytvoří tak kořen výsledného svaru. Zkoušky byly provedeny na VUT FSI, použito svařovacího řízení Eutronicgap3001.

5.1 Svařovací řízení

Zařízení EUTRONIC GAP 3001 DC – výrobce firma Castolin S.A., Švýcarsko

Parametry řízení:

Napájení.....3x400V
Napájecí frekvence.....50/ 60Hz
Intenzita pilotního proudu.....0,5–1 0A
Intenzita svařovacího proudu.....0,3–160A
Napětí naprázdno.....110V

Zařízení je vhodné pro:

- svařování plazmovým paprskem key-hole
- navařování plazmou práškem
- svařování plazmovým paprskem studeným drátem
- TIG svařování
- TIG svařování studeným drátem.

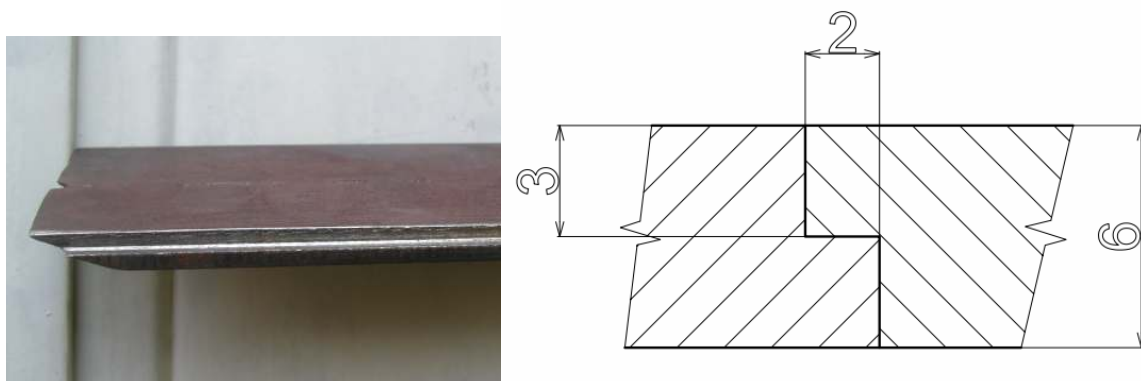


Obr. č. 5.1 Eutronicgap3001DC

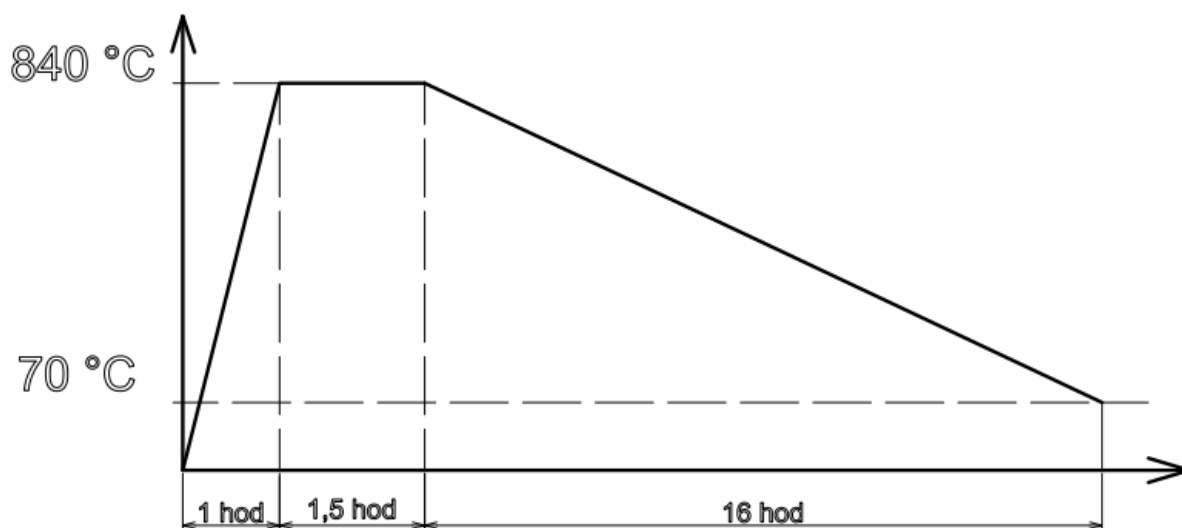
5.2 Provedení zkoušky

Na zkušební plechy z oceli 30 CrMoNiV 5-11 bylo vyfrézováno osazení srovněry viz obrázky 5.2. Vzhledem k vysoké pevnosti daného materiálu bylo nutno, ještě před vytvořením drážek, plechy vyžít. Průběh použitého tepelného zpracování je na

obrázku 5.3. Oproti zkušebním svarům v kapitole číslo 4 byla používána tryska průměru 1,2mm. Napětí u všech svařovaných vzorků bylo 30 V. Důležitým kritériem zkoušky bylo kompletní protavení zámku.



Obr.č.5.2 Osazení zkušebních vzorků, fotografie a rozměry



Obr. č.5.3 Průběh tepelného zpracování vzorků



Obr. č.5.4 Svařovací prostor, vlevo detail hořáku, vpravo ohřev základního materiálu

5.3 Hodnocení svar ůvosazení

Zkouška prob ěhlaná dvou vzorcích, na každém z nich bylo provedeno několik svar ů s různými parametry sva řování. Při sva řování bez předehřevu nedocházelo k dostate čnému protavení materiálu a následně tvorby Keyhole, zása dní bylo tedy dodrženo dostate čné teploty předehřevu. Jako plazmový plyn byl použit argon a jako ochranný plyn sm ěr argonu a vodíku (7% H₂; 93% Ar). U všech provedených svar ů, bylo ho řádně nejprve podobu p ětiaž desetisekund po zapálení oblouku ponechám bez posuvu, zd ůvodu protavení materiálu a následně tvorby Keyhole.

svar číslo	svařovací proud (A)	posuv (cm/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota předehřevu (°C)
Vzorek I - vzdálenost trysky od materiálu 5mm						
1	45	10	1,2	1	10	300
2	45	10	1,2	1,2	10	
3	45	8	1,2	1,2	10	350
4	45	8	1,2	1,25	10	
Vzorek II - vzdálenost trysky od materiálu 4mm						
1	45	8	1,2	1,25	10	300
2	45	8	1,2	1,25	10	350
3	45	8	1,2	1,4	10	380

Tab. č. 28 Sva řovací parametry

Parametry zkušebních svar ů viz tab. 28. Jakonej jakostnější svař se jeví číslo 2 a 3 na vzorku II – obr. č. 5.5 a 5.6. U obou svar ů je použit pom ěrn ě vysoká teplota předehřevu, to mělo p řízlivý vliv na kvalitu svaru. V kombinaci se zvýšen ým pr ůtokem plynu u svaru 3 se dosáhlo nejstabilnějšího protavení. Na obrázcích je patrn ě propadnutí povrchu svar ů, to je způsobeno v ůlemi vosazení. Vzhledem k tomu, že na svar budou n ěavařovány další vrstvy metodou SAW, propadnutí povrchu svaru nebude mít na celkovou pevnost svaru vliv. Při svařování nebyl použit krycí plyn pro ochranu ko řene svaru, došlo tedy k pom ěrn ě silnému zoxidování ko řene.



Obr. č. 5.5 Povrch svaru - vzorek II svar 3



Obr. č.5.6Povrchsvaru-vzorkuII svar2

Na obrázku číslo 5.7 je vidět neprotavený zámek. Na dalších obrázcích 5.8 a 5.9 je protavená Keyhole na konci svaru, obr. 5.8 z pohledu na povrch svaru a 5.9 na kotvení svaru. Na povrchu svaru má Keyhole průměr 4,2 mm a u kotvení svaru 1 mm. Z těchto dvou fotografií je také dobře patrné umístění svaru vzhledem k vytvoření mu zámku, osasvaru byla shodná s osou osazení.



Obr. č.5.7Neprotavený zámek



Obr. č.5.8 Klíčová dírká na povrchu svaru



Obr. č.5.8 Klíčová dírká u kořene svaru

5.4 Hodnocení, I“svarů

Kromě zkoušky protavení osazení bylo provedeno několik dalších svarů typu „I“, tedy bez úpravy svarového úkosu. Mezera mezi hořákem a základním materiálem byla u všech svarů 5 mm, ostatní parametry v tabulce č. 29.

svar číslo	svařovací proud I (A)	posuv (cm/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota předehřevu (°C)
1	40	8	1,2	1,4	10	250
2	47	8	1,2	1,4	10	250
3	47	7	1,2	1,6	10	250
4	47	7	1,2	1,6	10	200
5	47	7	1,2	1,6	10	200

Tab. č. 29 Svařovací parametry I“svarů

U svarů 1 a 2 nedošlo k dostatečnému protavení kořene svaru, další svary se po navýšení průtoku plazmového plynu a snížení rychlosti svařování provalily a vytvořily rovnoměrný kořen a převýšení asi 1,3 mm. Nejlepší je svar číslo 5 na obrázku č. 5.10 a 5.11. Jak je patrné z fotografie povrchu, svar je na částku svařování širší a postupně se zužuje až na stabilnější řky svaru. Tento jev je způsobený po částečném protavením materiálu, při kterém dojde při „vpichu“ plazmového paprsku k navýšení teploty okolního materiálu. Na obou fotografiích je také vpravo protavená samostatná Keyhole. Jak je vidět, klíčová díra je při částečném protavení podstatně větší, než na konci svaru (na obrázku vlevo).



Obr. č. 5.10 Povrch svaru číslo 5. Vpravo na obrázku protavená Keyhole.



Obr. č. 5.11 Kořen svaru číslo 5

5.5 Hodnocenípr ůvarůdoplňéhomateriálu

Vposledním kroku bylo provedeno n ěkolik zkušebních svar ů do plného materiálu. Cílem bylo naleznout sva řovací parametry ideálních svar ů. Klíčové bylo najít optimální podmínkyprovytvo řeníKeyholeaudržetjevcelédélcesvaru,ztohoto pohledubylazásadní hodnotateplotyp ředehřevu.

svar číslo	svařovací proud (A)	posuv (cm/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota předehřevu (°C)
1	47	7	1,2	1,6	10	250
2	47	7	1,2	1,3	10	250
3	47	7	1,2	1,6	10	250
4	47	7	1,2	1,6	10	250
5	47	7	1,2	1,6	10	-
6	47	7	1,2	1,6	10	-
7	47	7	1,2	1,6	10	300
8	47	7	1,2	1,4	10	150
9	47	7	1,2	1,6	13	-
10	47	7	1,2	1,6	15	130
11	47	9	1,2	1,6	15	130

Tab. č.30Sva řovacíchparametry–plnýmateriál.

Vtabulce č. 30 jsou parametry všech svar ů, vzdálenost ho řáku od základního materiálu byla 5 mm. Výjimkou byly svary číslo 3 a 5 u kterých byla tato vzdálenost 4 mm. Vpr ůběhuzkoušekbylapředikovánasouvislostmezitoutov zdálenostiap řevýšenímko řene, což se nakonec nepotvrdilo. Na obrázku 5.12 a 5.13 je svar číslo 5, který byl prova řen za studena.



Obr. č.5.12Povrchsvaru5

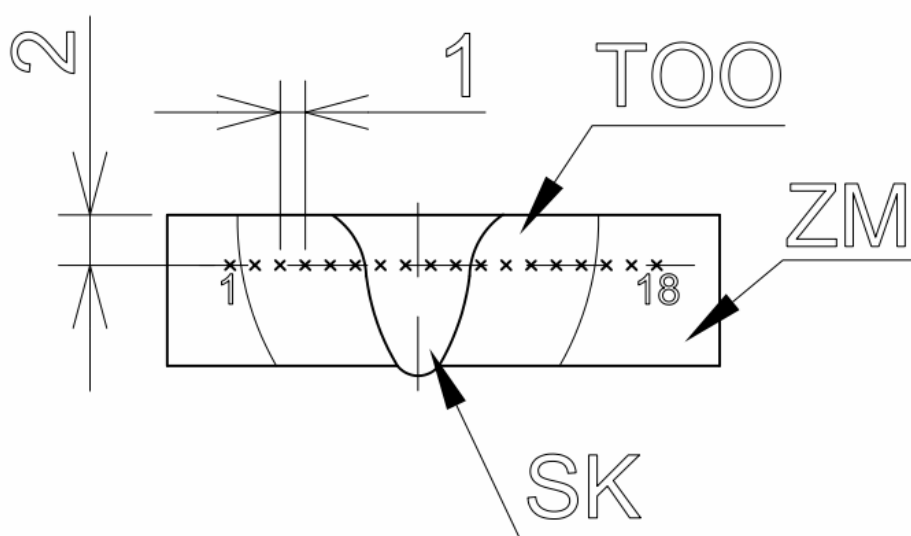


Obr. č. 5.13 Kořensvaru 5

5.6M ěření tvrdosti HV10

5.6.1M ěření vzorku – parametrizace zkoušky vzorek 5

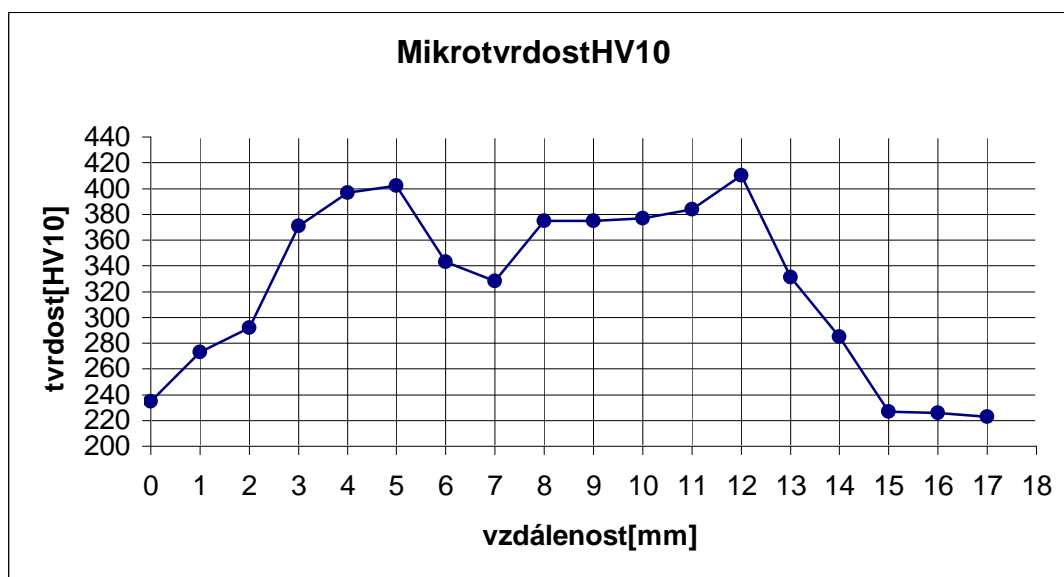
Vzorek č. 5 byl tedy krom ě metody HV1 v kapitole 4.6, prom ěřen ještě metodou HV10. Parametry svařování byly již popsány v kapitole 4.6.1. Rozmíst ěním ěřících bod ů je na obrázku č. 5.14. Oproti p ředchozím ěřením mikrotvrdosti v kapitole 4.6, které neprob ěhly z oblasti TOO až na základní materiál, byla v tomto kroku m ěřena tvrdost v celém pr ůřezu svarem až na základní tepeln ě neovlivn ěný materiál. Stejn ě jako v p ředchozím hodnocení oblast TOO 1 p řiléhá ke svarovému kovu a TOO 2 k základnímu materiálu. Pr ůběh tvrdosti je graficky znázorn ěn na obr. 5.15.



Obr. č. 5.14 Umíst ěním ěřených bod ů

	č.m. měření	vzdálenost [mm]	tvrdost [HV10]
ZK	1	0,0	235
TOO2	2	1,0	273
	3	2,0	292
TOO1	4	3,0	371
	5	4,0	397
	6	5,0	402
SK	7	6,0	343
	8	7,0	328
	9	8,0	375
	10	9,0	375
TOO1	11	10,0	377
	12	11,0	384
	13	12,0	410
TOO2	14	13,0	331
	15	14,0	285
ZK	16	15,0	227
	17	16,0	226
	18	17,0	223

Tab. č.31 Hodnoty měření mikrotvrdosti HV10



Obr. č.5.15 Průběh tvrdosti HV10

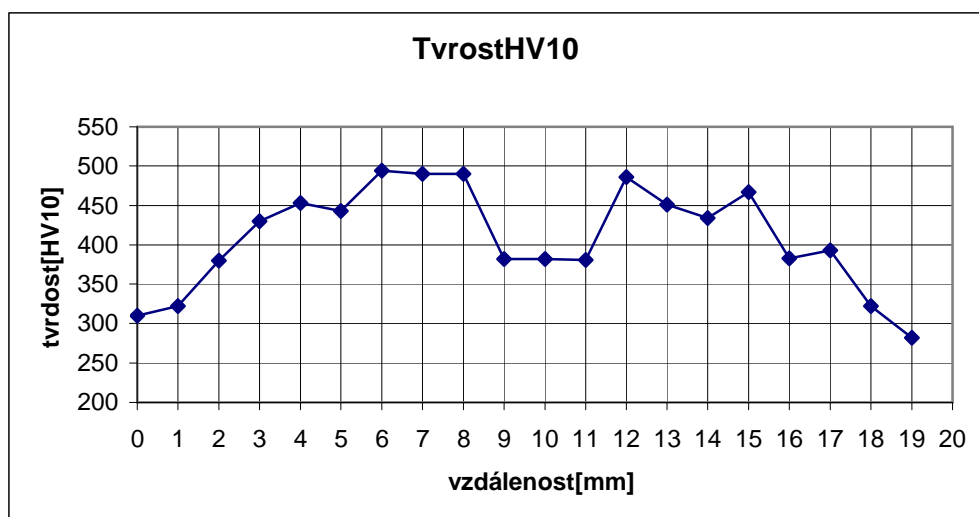
Jedná se o svar bez použití přehřevu. Nejvyšší tvrdost je dosažena v oblasti TOO1 asi 400 HV. Průběh rychlosti tvrdosti odpovídá měření z kapitoly 4.6.

5.6.2M ěření vzorku – protavení vosazení vzorek 2

Jedná se konkrétně o svar číslo 3 na druhém vzorku. Svařovací parametry viz tabulka číslo 28, p ředehřev 380 °C. Umístění jednotlivých měřících vpichů přibližně odpovídá obrázku 5.14 předcházejícího ěření.

	č.m ěření	vzdálenost [mm]	tvrdost HV10
ZK	1	0,0	310
	2	1,0	322
	3	2,0	380
	4	3,0	430
TOO	5	4,0	453
	6	5,0	443
	7	6,0	494
	8	7,0	490
	9	8,0	490
SK	10	9,0	382
	11	10,0	382
	12	11,0	381
TOO	13	12,0	486
	14	13,0	451
	15	14,0	434
	16	15,0	467
	17	16,0	383
ZK	18	17,0	393
	19	18,0	322
	20	22,0	282

Tab. č. 32 Hodnoty měření mikrotvrdosti HV10



Obr. č. 5.16 Průběh tvrdosti HV10

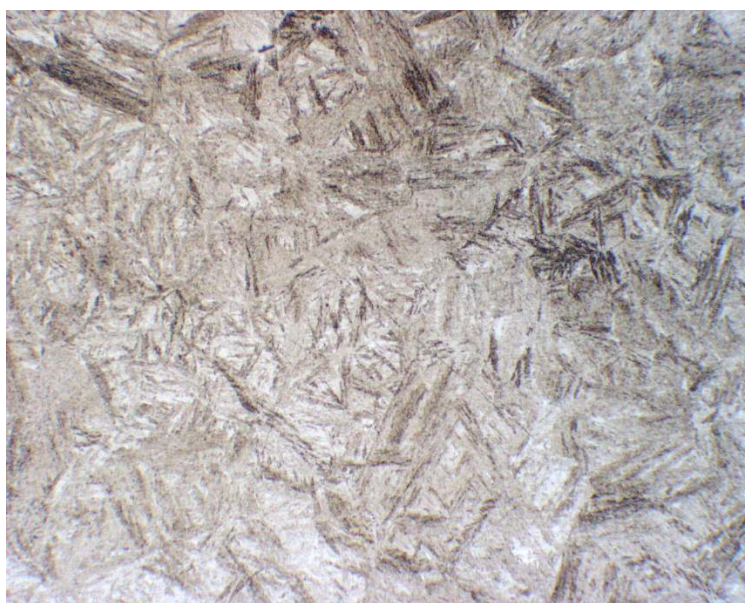
Průběh měření tvrdosti je obdobný s předchozím ěřením, ovšem u tohoto vzorku byla naměřena celkově vyšší tvrdost než u předchozího svaru 5, to je patrné z porovnání teplotního spádu měřícího vzorku a následným zakalením.

5.7 Mikrostruktura

U jednoho ze vzorků byla vyhodnocena materiálová struktura v pětisetnásobném zvětšení v několika místech. Svařované vzorky v kapitole č. 5 byly před svařením vyžehány podle obrázku 5.3, z důvodu snížení tvrdosti pro snadnější tvorbu osazení. Toto tepelné zpracování mohlo mít vliv na materiálovou strukturu. Ovšem porovnáním mikrostrukturou v kapitole 4.7 je možno konstatovat, že struktury v všech zkoumaných místech jsou stejné a mění se pouze jejich hrubost. Svarový kov – obr. č. 5.17, tepelně ovlivněná oblast TOO1 obr. č. 5.18 a TOO2 obr. č. 5.19 jsou martenzitické struktury. Nejhrubší martenzit se nachází ve svarovém kovu, jemnější v oblasti TOO1 a k maximálnímu zjemnění dochází v oblasti TOO2. Na obrázku 5.20 je srovnání martenzitu se strukturou základního materiálu. Základní materiál je stejný jako v kapitole 4.7 feriticko-perliticko-bainitický směs obr. č. 5.21. Perlit se působením vysokých teplot mění na ferit a na fotografii je zobrazen jako bílá zrna.



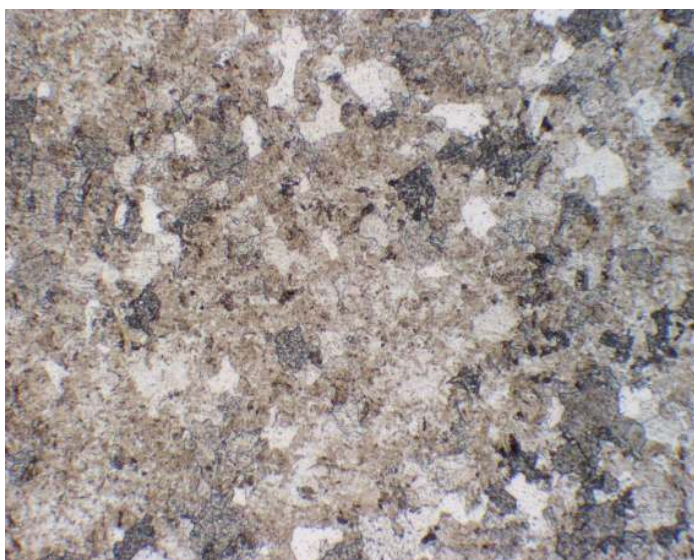
Obr. č. 5.17 Svarový kov zvětšení 500x



Obr. č. 5.18 TOO1 zvětšení 500x



Obr. č.5.19TOO2zv ětšení500x



Obr. č.5.20P řechodzTOO2naZMzv ětšení500x



Obr. č.5.20Základnímateriálzv ětšení500x

6. Diskuse výsledků

V první části experimentu, kapitola č. 4, bylo svařeno poměrně velké množství vzorků s různými parametry svařování a provedeno několik měření. Cílem bylo naleznout optimální svařovací parametry, při kterých je vytvořeno svar požadované jakosti, zejména zdůrazněna jeho kořena. U většiny zkušebních svarů bylo kořeno rovnoměrně svýrazným změnami výšky kořene. Povrch byl u téměř všech svarů propadlý, většinou nebylo propadnutí hlubší než 1 mm. Vzhledem k následnému svařování dalších vrstev metodou SAW toto propadnutí povrchu svaru nebudeme mít vliv na celkovou pevnost a kvalitu svaru.

Nejlépe vyhodnocené svary byly vzorky číslo 23 a 25 z druhé sady, s parametry svařování: $I = 47,1 \text{ A}$, $U = 39,2/39,4 \text{ V}$, průtok plynu $1,4 \text{ l/min}$, vzdálenost trysky od základního materiálu 5 mm a rychlost svařování $0,06 \text{ m/min}$. Kořeny svarů byly rovinné a pravidelné, šířka kořene $0,8$ až $0,7 \text{ mm}$.

Pro měření mikrotvrdosti byly vybrány tři vzorky se zhruba stejnými svařovacími parametry, ale s rozdílnou teplotou předehřevu. Podle očekávání měla rozdílná teplota předehřevu výrazně ovlivnit průběh tvrdosti jednotlivých vzorků. Ve skutečnosti se ovšem naměřené hodnoty mikrotvrdosti všech tří svarů odlišovaly jen nepatrně.

V kapitole 4.4 byla podle normy ČSN EN 1011-2 vypočtena doporučená teplota předehřevu. Vypočtená hodnota pro daný materiál 30 CrMoNiV 5-11 tloušťky 6 mm , je 221°C .

U vzorku číslo 5 byla v několika místech vyhodnocena materiálová struktura – kapitola 4.7. V oblasti nejvyšší naměřené tvrdosti se vyskytuje martenzit s proměnlivou hrubostí, přičemž zrodily mikrotvrdosti hrubé struktury v TOO1 a jemnější struktury v TOO2 nejsou významné.

V druhé části experimentu, v kapitole č. 5, bylo vytvořeno několik zkušebních svarů, se cílem ověřit kvalitu protavení navrženého zámku. Optimální se jevil svar číslo 3 na druhém svařování vzorku následujícími parametry svařování: $I = 45 \text{ A}$, $U = 30 \text{ V}$, průtok plazmového plynu $1,4 \text{ l/min}$, svařovací rychlost 8 cm/min a teplota předehřevu 380°C , použitou tryskou o průměru $1,2 \text{ mm}$. Povrch svarů byly propadlé výrazněji než u vzorků v kapitole 4, to bylo způsobeno v úlepi zámku, jak už bylo popsáno výše, s ohledem na následné svařování metodou SAW propadnutí povrchu svaru nevede.

Dále byla měřena tvrdost metodou HV10. Průběhy obou naměřených křivek byly obdobné, ovšem tvrdost vzorku č. 2 byla celkově vyšší. Zvýšená tvrdost tohoto vzorku oproti vzorku č. 5 byla patrně způsobena rozdílnými teplotními spádem při chladnutí. Zatímco vzorek č. 5, který byl svařován ve firmě Siemens, byl ohříván na teplotu předehřevu spolu s přípravkem a izolován vatou jak je vidět na obrázcích 4.1 a 4.2, při svařování vzorku č. 2, byl ohříván pouze svařovaný materiál bez použití tepelné izolace – obr. č. 5.4. V druhém případě tedy došlo vlivem rozdílné teploty svařovacího přípravku (asi 60°C) a vzorku, ke strmějšímu teplotnímu spádu při ochlazení ze svařovací teploty. Vzhledem k vysokému obsahu uhlíku a chromu v použité oceli se dá předpokládat, že tato ocel je schopna samozakalení při chladnutí po svařování. Vlivem rychlejšího odvodu tepla způsobeného přípravkem, byla křivka chladnutí strmější, rychlost chladnutí byla vyšší a ocel se zakalila.

7. Závěr

Novou technologii svařování kořene svaru plazmovým paprskem, při spojování rotorů turbín, je možno doporučit. Jak již bylo popsáno, svar bude procházet přes osazení v obou částech rotoru, které slouží k jeho souosému sestavení. Z vyhodnocení zhotovených svarů vyplývá, že protavení tohoto zámkuplazmou je dostatečné, svar je celistvý a bez dalších vad, které by mohly být způsobené zmíněným zámkem. Důležité je dbát správného umístění svaru vzhledem k zámku, v provedených experimentech byl svar umístěn do osy osazení jak je patrné z obrázku č. 5.8, ovšem ideální poloha paprsku v úči osazení bude předmětem dalších zkoušek.

Pro vytvoření ideálního svaru je nutné dodržovat zejména dostatečnou teplotu přehřevu a kořen svaru chránit dostatečným průtokem krycího plynu. Důležité je také zajistit potřebnou teplotu přehřevu celé svařovací soustavy tedy svařence i případného přípravku a celou ji dostatečně tepelně izolovat, zdůvodu možného zakalení svaru vlivem vysoké rychlosti ochlazení svařovaného materiálu. Svařování plazmou je velmi citlivé na změnu průtoku plazmového plynu a vzhledem k charakteristicky úzkému paprsku, také na vyosení dráhy svařování v úči svařované mezeře.

Pro svařování osazení byla zhotovena předběžná specifikace svařovacího postupu - příloha č. 5. Navržené rozměry zámkuprovzájemné ustavení rotoru dostatečně čí, ovšem dále je třeba zajistit dostatečný přístup svařovacího zařízení ke kořenu svaru, který bude prováděn v úzkém úkosu hluboký až 200 mm. V současné době probíhá řízení o získání užitého vzoru pro návrh chlazené plazmové trubice pro svařování do úzkého úkosu. Vzhledem ke špatné dostupnosti ke kořenu svaru po svařování rotoru, bude třeba zajistit kontrolu zaručeného protavení materiálu. Kontrola spolehlivosti protavení bude spočívat ve sledování svařovacího procesu pomocí kamery, která bude sledovat chování taveniny v klíčovém dírci.

Seznampoužitých zdrojů

- [1.] DVOŘÁK, M. a kol. *Technologie II*, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
- [2.] BLAŠČÍK, F. a kol. *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvárania*, 1vyd. ALFA Bratislava 1988, 830s. ISBN 063-563-87
- [3.] KOLEKTIV AUTOR Ů. *Materiály a jejich svařitelnost*, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
- [4.] KOLEKTIV AUTOR Ů. *Technologie svařování a za řízení*, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
- [5.] KOLEKTIV AUTOR Ů. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových za řízení*, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70 -5
- [6.] KOLEKTIV AUTOR Ů. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1
- [7.] PRUMENSKÝ, Jaroslav; FOLDYNA, Václav Moderní kotlové oceli pro energetiku a teploenergetiku. In *Technická konference Hustopeče 2009*. [s.l.]: TDS Brno-SMS, s.r.o., 2009. s. 12. ISBN 978-80-87102-04-6.
- [8.] PRUMENSKÝ, Jaroslav; FOLDYNA, Václav Žárupevnost a její vliv na životnost energetických za řízení. In *SBORNÍK KONFERENCE - Hrotovice 2008*. [s.l.]: TDS Brno-SMS, s.r.o., 2008. s. 9. ISBN 978-80-87102-00-8.
- [9.] FOLDYNA, Václav; KOUKAL, Jaroslav Vývoj nových ocelí pro energetiku a chemické strojírenství na bázi 2 až 3% Cr. In *Sborník konference 2002*. [s.l.]: [s.n.], 2002. s. 8. ISBN 80-248-0168-X.
- [10.] FREMUNT, Přemysl; PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Konstrukční oceli*. [s.l.]: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1996. ISBN 80-85867-95-8.
- [11.] PILOUS, Václav Svarové spoje nízkolegovaných žárupevných ocelí v energetickém strojírenství. In *SBORNÍK KONFERENCE - Hrotovice 2008*. [s.l.]: TDS Brno-SMS, s.r.o., 2008. s. 10.
- [12.] BRZIAK, Peter. *Www.matdesign.sav.sk* [online]. 2008 [cit. 2010-04-01]. Ziaruvzdorné a žiarupevné zliatiny na báze železa. Dostupné z WWW: <www.matdesign.sav.sk/data/long_files/brziak.pdf>.
- [13.] HRACHOVINA, Petr P Řídké materiály BTS používané v energetice. In *Sborník konference - Hrotovice 2007*. Brno: TDS Brno-SMS s.r.o., 2007. s. 10. ISBN 80-903386-8-2.

- [14.] MARTINEC, Jiří; ONDRAŠÍK, Břetislav. Svařování do úzkého úkosu ve společnosti Vítkovice a.s.. *Spektrum*. 2007, 2, s. 2. Dostupný také z WWW: <http://www.esab.cz/cz/cz/news/upload/spektrum2_2007CZ.pdf>.
- [15.] *Bohler-uddeholm.cz* [online]. Germany: BTSGD, 2005 [cit. 2010-04-28]. Přídavné materiály. Dostupné z WWW: <http://www.bohler-uddeholm.cz/czech/files/Svary_oceli_elektrarny.pdf>.
- [16.] SCHLIXBIER, Michal. Trendy vývoje svařování plazmou. *Konstrukce*. 7.9.2005, 2005, 4, Dostupný také z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/trendy-vyvoje-svarovani-plazmou/>>.
- [17.] *Intercut.cz* [online]. 2006 [cit. 2010-05-05]. Ke stažení. Dostupné z WWW: <<http://www.intercut.cz/texty/svarovani-plazmou.pdf>>.
- [18.] Specialita určená pro vysoké nároky. *Weld + vision*. 2004, 2004, 1.04, s. 1. Dostupný také z WWW: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-423545E6-806CE10A/fronius_mexico/4000062140_weld_vision_Nr12_cz.pdf>.
- [19.] *Aluminium.matter.org.uk* [online]. 2009 [cit. 2010-05-05]. Plazma Keyhole Welding. Dostupné z WWW: <<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=203&pageid=2144416857>>.
- [20.] SHIGE, Takashi, et al. Development of Large-Capacity, Highly Efficient Welded Rotor for Steam Turbines: In *Mitsubishi Juko Giho (Japan)*. Vol. 37, no. 3, 2000. Japonsko: [s.n.], 2001. s. 130-133. Dostupné z WWW: <<https://www.mhi.co.jp/en/technology/review/pdf/e381/e381006.p>>.
- [21.] *Mecweb.messer-is.com* [online]. [cit. 2010-05-07]. Publications. Dostupné z WWW: <http://mecweb.messer-is.com/wCastolin_com/pdf/publications/PTAW_DH.pdf>.
- [22.] JELÍNEK, Vladimír. Používané technologie svařování a materiály při výrobě turbín. In *SBORNÍK HROTOVICE - Hrotovice 2007*. Brno: TDS Brno - SMS s.r.o., 2007. s. 4. ISBN 80-903386-8-2.
- [23.] *Homen.vsb.cz* [online]. 2009 [cit. 2010-05-14]. Homen. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-01-15.pdf>>.
- [24.] *Schinkmann.cz* [online]. 2008 [cit. 2010-05-14]. Svařování plazmou. Dostupné z WWW: <<http://www.schinkmann.cz/svarovani-plazmou?popup=0>>.
- [25.] *Linde-gas.cz* [online]. 2008 [cit. 2010-05-14]. Svařování plazmou. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_licht3>.

- [26.] CHUDÍK, Ivan. Výběr ochranných plynů pro obloukové svařování. *Konstrukce* [online]. 11.11. 2008, 2008, [cit. 2010-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/vyber-ochrannych-plynu-pro-obloukove-svarovani/>>.
- [27.] *Gordonengland.co.uk* [online]. [cit. 2010-05-19]. Plasmy Flame Theory. Dostupné z WWW: <<http://www.gordonengland.co.uk/pft.htm>>.
- [28.] ČSN EN ISO 5817 . *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) – Určování stupňů kvality* .[s.l.]:[s.n.], leden 2008. 28s.
- [29.] ČSN EN 1011-2 . *Svařování. Doporučení pro svařování kovových materiálů Část 2 Obloukové svařování feritických ocelí* .[s.l.]:[s.n.], duben 2002. 56s.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Označení	Legenda	Jednotka
T	teplota	[°C]
T _m	teplota tavení	[°C]
T _P	teplota přehřevu	[°C]
R _P	precipitační zpevnění	
R _S	substituční zpevnění	
R _D	dislokační zpevnění	
R _{P-N}	Pierls–Nabarrovo napětí	
l	střední vzdálenost částic vytvrzujících fází	[mm]
x _α	obsah legujících prvků v roztoku	[%]
ρ	střední hustota dislokací	[kg/m ³]
l _{ef}	vzdálenost částic disperzní fáze	[mm]
ε _s	rychlost tečení	[m/s]
Mo _{eq}	molybdenový ekvivalent	[%]
K _d	konstanta rychlosti hrubnutí	
t	čas	[s]
d	střední průměr částic v čase t	[mm]
d ₀	střední průměr částic v čase t=0	[mm]
HD	obsah difúzního vodíku	[%]
Q _S	tepelný příkon	[kJ/mm]
d	tloušťka	[mm]
R _m	mezpevnosti	[MPa]
R _{p0.2}	smluvní mezkluзу	[MPa]
R _e	mezkluзу	[MPa]
A	tažnost	[%]
Z	zúžení	[%]
A _v	nárazová práce	[J]
U	napětí	[V]
I	proud	[A]
α	úhel	[°]
v _s	rychlost svařování	[m/min]
η	účinnost	[%]
h	výška kořeny svaru	[mm]
b	šířka kořeny svaru	[mm]
ARA	anizotropický rozpad austenitu	
CET	uhlíkový ekvivalent	
UCS	odolnost proti krystalizačnímu praskání	
RT	zkouška tečení do lomu	
TZ	tepelné zpracování	
TIG, WIG	svařování netavicí elektrodou v ochranném plynu	
PAW	svařování plazmou	
SAW	svařování pod tavidlem	
AC	střední proud	
DC	stejný proud	
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
ZM	základní materiál	
SK	svarový kov	
HV	tvrdost podle Vickerse	

Seznam příloh

Příloha č.1: Inspekční certifikát

Příloha č.2: Protokol měření – vzorek 2

Příloha č.3: Protokol měření – vzorek 5

Příloha č.4: Protokol měření – vzorek 27

Příloha č.5: Předběžná specifikace svařovacího postupu-pWPS

Příloha1

Inspekční certifikát EN 10 204 3.1		MCJ06		Protokol č. 0859/2009	
				Datum: 16.02.2009	

ZDAS a.s.
 Inspekční certifikát EN 10 204 3.1

TDS a.s. je certifikován společností TÜV NORD v systémech:
 ISO 9 001 2000 (No 04100934025)
 ISO 14 001 2004 (No 04104059016)
 OHSAS 18 001 2007 (No 04116059005)

Siemens Industrial Turbomachinery
 s.r.o.
 Olomoucká 7/9
 618 00 Brno
 ČESKÁ REPUBLIKA

Inspekční certifikát EN 10 204 3.1

Stran: 1

Zakázka K-021-0128	B.č. 1	Objednávka T-45180	Objednatel SIEMENS INDUSTRIAL Olomoucká 7/9
Výkres CV314650-4	Název ZKUŠEBNÍ VZOREK	Typ výrobku VYKOVEK	
Materiál 30CrMoNiV511		Norma SEW555 /1.1.2001	
Tavba 38038	Druh výroby EO_LF_VD	Pořadová čísla 552093-552100	Počet kusů 8

Výrobce prohlašuje, že výrobky jsou ve shodě s kupní smlouvou 84073/2008-KOV
 a jinými technickými dokumenty TQ/19000/08 MAA016 1S

Ražení:
 číslo tavby, číslo výkovku

Chemické složení tavby

Obsah prvků v %, obsah vodíku v ppm. Nebyla překročena hmotnostní aktivita 0.1 Bq/g ekvivalent Co 60

Tavba	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
min.	0.26	0.30				1.10	0.50	1.00	0.25	
max.	0.34	0.60	0.15	0.010	0.007	1.40	0.75	1.20	0.35	0.010
38038	0.31	0.60	0.02	0.005	0.001	1.25	0.71	1.10	0.31	0.005

Přílohy:

- Protokol o mechanických zkouškách 0298/2009
- Protokol o měření tvrdosti 0418/2009
- Protokol o tepelném zpracování 0463/2009
- Rozměrový protokol 0887/2009
- Hodnocení mikročistoty 0078/2009
- Hodnocení velikosti zrna 0087/2009, 0088/2009, 0089/2009, 0090/2009, 0091/2009, 0092/2009, 0093/2009, 0094/2009
- Chemický rozbor 0017/2009
- Protokol o magnetické zkoušce 0320/2009
- Protokol o ultrazvukové zkoušce 0427/2009

Pracoval Ficbauerová Aneta	 ZDAS, a.s. Zřídil red. Sázavou DIČ CZ453471161 IČ 453471161 • 60 •	Schválil Sedlák Zdeněk Závěsní přejmač
--------------------------------------	--	---

19.02.2009 07:30:17



ZDAS, a.s.

Inspekční certifikát EN 10 204 3.1

MOJ04

Protokol č. 0298/2009

Zakazka	82	Objednávka	Zakazník
K-021-0128	1	T-45180	SIEMENS INDUSTRIAL Olomoucká 7/9
Vykres	CV314850-4		Název
			ZKUŠEBNÍ VZOREK
			Materiál
			30CrMoNiV511

Protokol o mechanických zkouškách

Vzorek	Rvz	Tavba	Pořadová čísla
552093		38038	552093
552094		38038	552094
552095		38038	552095
552096		38038	552096
552097		38038	552097
552098		38038	552098
552099		38038	552099
552100		38038	552100

Zkouška tahem (ČSN EN 10002-1 a ČSN EN 10002-5)									
Vzorek		Zk.	do [mm]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Z [%]	Teplota	Směr
552093	předepsáno	1 x	10,00	Rp0,2	min. 550	700- 850	15,0	40,0	20 Tangenciální
552093	zjištěno	01	10,00	Rp0,2	586	719	22,0	69,8	20
552094	předepsáno	1 x	10,00	Rp0,2	min. 550	700- 850	15,0	40,0	20
552094	zjištěno	01	10,00	Rp0,2	595	747	18,6	68,6	20
552095	předepsáno	1 x	10,00	Rp0,2	min. 550	700- 850	15,0	40,0	20
552095	zjištěno	01	10,00	Rp0,2	583	724	18,8	68,6	20
552096	předepsáno	1 x	10,00	Rp0,2	min. 550	700- 850	15,0	40,0	20
552096	zjištěno	01	10,00	Rp0,2	590	730	19,8	67,5	20
552097	předepsáno	1 x	10,00	Rp0,2	min. 550	700- 850	15,0	40,0	20
552097	zjištěno	01	10,00	Rp0,2	616	764	19,4	66,2	20
552098	předepsáno	1 x	10,00	Rp0,2	min. 550	700- 850	15,0	40,0	20
552098	zjištěno	01	10,00	Rp0,2	601	742	20,8	67,5	20
552099	předepsáno	1 x	10,00	Rp0,2	min. 550	700- 850	15,0	40,0	20
552099	zjištěno	01	10,00	Rp0,2	611	751	19,2	68,6	20
552100	předepsáno	1 x	10,00	Rp0,2	min. 550	700- 850	15,0	40,0	20
552100	zjištěno	01	10,00	Rp0,2	600	736	19,6	69,8	20

Výsledek zkoušky		Strana 1 / 2	
provedl	 ZDAS, a.s. Žďár nad Sázavou DIČ CZ40347140 IČ 46347160 • 66 •	Schválil	
Zimplová Helena		Sedláček Zdeněk	
		Závodní přejímač	

Inspekční certifikát EN 10 204 3.1

MOJ10

Číslo 0017/2009

Zakázka K-021-0128	B.c. 1	Objednávka T-45180	Zakázka SIEMENS INDUSTRIAL Brno
Výkres CV314850-4	Název ZKUŠEBNÍ VZOREK		Material 30CrMoNiV511

Chemický rozbor

Vzorek	Tavba	Poradové číslo
552093	38038	552093
552094	38038	552094
552095	38038	552095
552096	38038	552096
552097	38038	552097
552098	38038	552098
552099	38038	552099
552100	38038	552100

Chemické složení

Obsah prvků v %, obsah vodíku v ppm. Nebyla překročena hmotnostní aktivita 0,1 Bq/g ekvivalent Co 60

Vzorek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	Sn	As	So
min.	0,25	0,30				1,10	0,60	1,00	0,25					
max.	0,34	0,80	0,15	0,010	0,007	1,40	0,75	1,20	0,35		0,010			
552093	0,30	0,60	0,02	0,005	0,001	1,25	0,71	1,12	0,32	0,13	<0,005	0,009	0,007	<0,0030
552094	0,30	0,59	0,02	0,005	0,001	1,24	0,70	1,10	0,31	0,13	<0,005	0,008	0,007	<0,0030
552095	0,31	0,60	0,02	0,005	0,001	1,25	0,71	1,13	0,32	0,13	<0,005	0,009	0,007	<0,0030
552096	0,31	0,60	0,02	0,005	0,001	1,25	0,72	1,10	0,32	0,13	<0,005	0,009	0,007	<0,0030
552097	0,31	0,60	0,02	0,005	0,001	1,26	0,71	1,13	0,32	0,13	<0,005	0,009	0,007	<0,0030
552098	0,30	0,59	0,02	0,005	0,001	1,25	0,71	1,11	0,31	0,13	<0,005	0,008	0,007	<0,0030
552099	0,30	0,60	0,02	0,004	0,001	1,24	0,71	1,10	0,32	0,13	<0,005	0,008	0,007	<0,0030
552100	0,30	0,59	0,02	0,004	0,001	1,24	0,70	1,10	0,31	0,13	<0,005	0,008	0,007	<0,0030

provedl Svatoň Josef, Ing	ZOAS ZOAS, s.s. Zdravá nad Bělavou DIČ CZ245471160 IČ 463471160 * 60 *	Schválil Sedlák Zdeněk Závodní přejímač
------------------------------	---	---

15.02.2009 07:31:20

Příloha2

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a

Téchnická 198/2

Vzorek : svar 02

Datum : 3.11.2009

Objed. číslo :

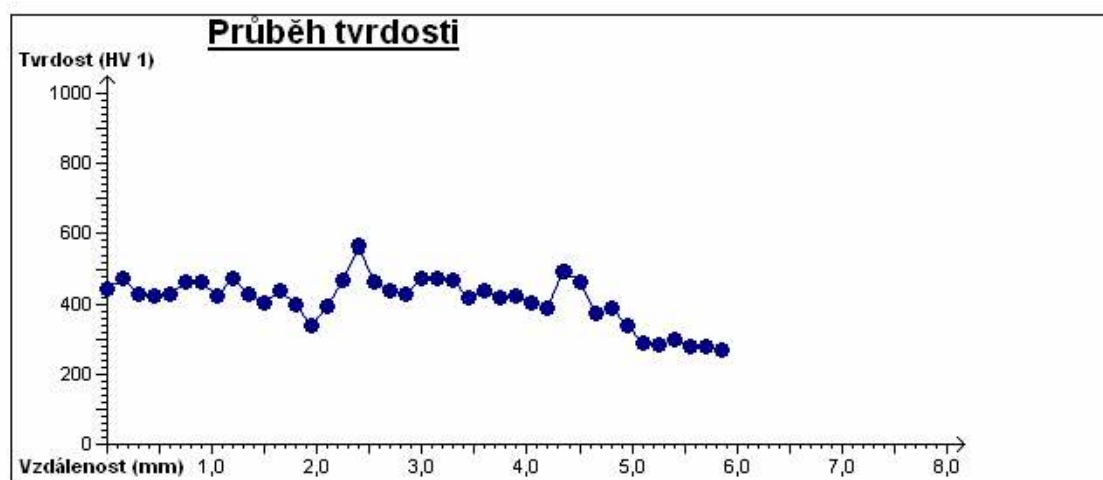
Měřil : Julis

Indentor : VICKERS Objektiv : X50

Čas : 10 Zatížení : 1

Material:

Předpis:



Řada	1						
Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1				
1	0.000	444 HV 1	44,8 HRC	22	3.150	477 HV 1	47,5 HRC
2	0.150	474 HV 1	47,2 HRC	23	3.300	469 HV 1	46,8 HRC
3	0.300	432 HV 1	43,8 HRC	24	3.450	422 HV 1	42,9 HRC
4	0.450	425 HV 1	43,2 HRC	25	3.600	439 HV 1	44,4 HRC
5	0.600	431 HV 1	43,7 HRC	26	3.750	418 HV 1	42,5 HRC
6	0.750	466 HV 1	46,6 HRC	27	3.900	423 HV 1	43,0 HRC
7	0.900	465 HV 1	46,5 HRC	28	4.050	405 HV 1	41,3 HRC
8	1.050	426 HV 1	43,3 HRC	29	4.200	390 HV 1	39,8 HRC
9	1.200	477 HV 1	47,5 HRC	30	4.350	494 HV 1	48,7 HRC
10	1.350	428 HV 1	43,5 HRC	31	4.500	467 HV 1	46,7 HRC
11	1.500	404 HV 1	41,2 HRC	32	4.650	374 HV 1	38,2 HRC
12	1.650	438 HV 1	44,3 HRC	33	4.800	389 HV 1	39,7 HRC
13	1.800	398 HV 1	40,6 HRC	34	4.950	341 HV 1	34,6 HRC
14	1.950	339 HV 1	34,3 HRC	35	5.100	288 HV 1	28,3 HRC
15	2.100	394 HV 1	40,2 HRC	36	5.250	286 HV 1	28,0 HRC
16	2.250	469 HV 1	46,8 HRC	37	5.400	302 HV 1	30,0 HRC
17	2.400	564 HV 1	53,2 HRC	38	5.550	278 HV 1	26,9 HRC
18	2.550	466 HV 1	46,6 HRC	39	5.700	280 HV 1	27,1 HRC
19	2.700	438 HV 1	44,3 HRC	40	5.850	268 HV 1	25,3 HRC
20	2.850	428 HV 1	43,5 HRC				
21	3.000	475 HV 1	47,3 HRC				

Příloha3

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a

Téchnická 198/2

Vzorek : svar 05

Datum : 3.11.2009

Objed. číslo :

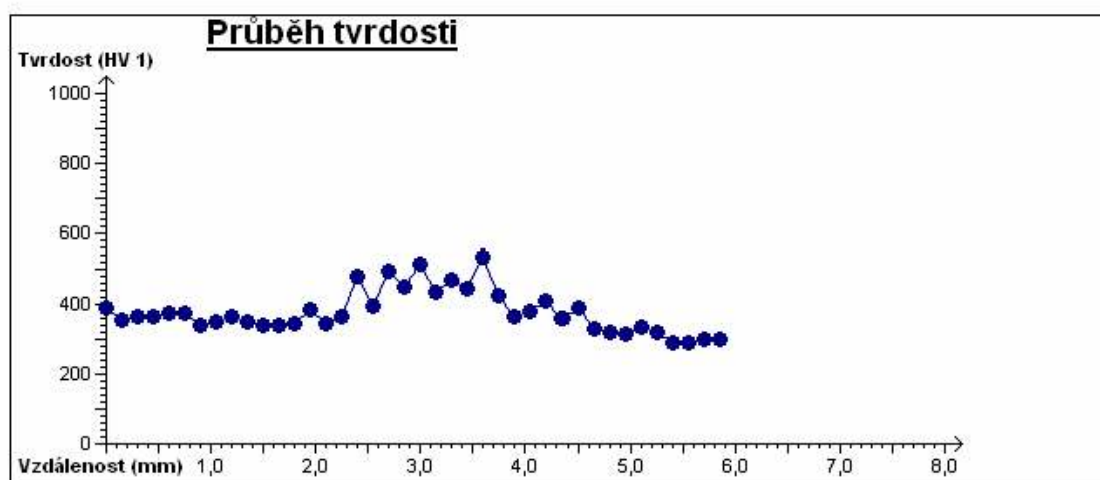
Měřil : Julis

Indentor : VICKERS Objektív : X50

Čas : 10 Zatížení : 1

Material:

Předpis:



Řada	1						
Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1				
1	0.000	389 HV 1	39,7 HRC	22	3.150	435 HV 1	44,1 HRC
2	0.150	356 HV 1	36,2 HRC	23	3.300	472 HV 1	47,1 HRC
3	0.300	367 HV 1	37,4 HRC	24	3.450	447 HV 1	45,1 HRC
4	0.450	365 HV 1	37,2 HRC	25	3.600	537 HV 1	51,6 HRC
5	0.600	373 HV 1	38,1 HRC	26	3.750	423 HV 1	43,0 HRC
6	0.750	373 HV 1	38,1 HRC	27	3.900	367 HV 1	37,4 HRC
7	0.900	340 HV 1	34,4 HRC	28	4.050	381 HV 1	38,9 HRC
8	1.050	352 HV 1	35,8 HRC	29	4.200	412 HV 1	42,0 HRC
9	1.200	365 HV 1	37,2 HRC	30	4.350	362 HV 1	36,9 HRC
10	1.350	348 HV 1	35,3 HRC	31	4.500	390 HV 1	39,8 HRC
11	1.500	341 HV 1	34,6 HRC	32	4.650	328 HV 1	33,1 HRC
12	1.650	341 HV 1	34,6 HRC	33	4.800	322 HV 1	32,4 HRC
13	1.800	347 HV 1	35,2 HRC	34	4.950	313 HV 1	31,4 HRC
14	1.950	386 HV 1	39,4 HRC	35	5.100	335 HV 1	33,9 HRC
15	2.100	347 HV 1	35,2 HRC	36	5.250	318 HV 1	32,0 HRC
16	2.250	366 HV 1	37,3 HRC	37	5.400	290 HV 1	28,5 HRC
17	2.400	480 HV 1	47,7 HRC	38	5.550	288 HV 1	28,3 HRC
18	2.550	395 HV 1	40,3 HRC	39	5.700	298 HV 1	29,5 HRC
19	2.700	493 HV 1	48,6 HRC	40	5.850	299 HV 1	29,6 HRC
20	2.850	448 HV 1	45,2 HRC				
21	3.000	515 HV 1	50,1 HRC				

Příloha4

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a

Těchnická 198/2

Vzorek : svar 23

Datum : 3.11.2009

Objed. číslo :

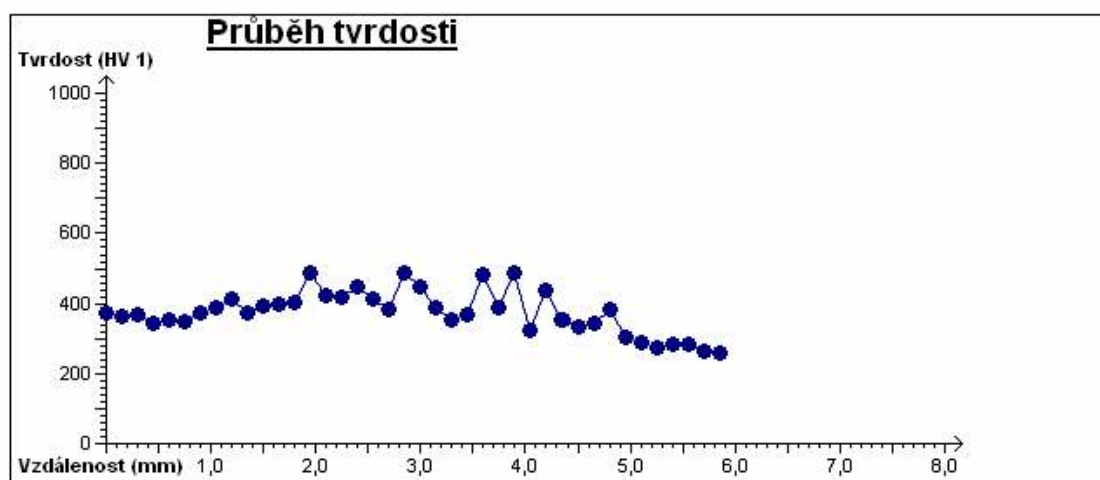
Měřil : Julis

Indentor : VICKERS Objektív : X50

Čas : 10 Zatížení : 1

Material:

Předpis:



Řada	1						
Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1				
1	0.000	373 HV 1	38,1 HRC	22	3.150	390 HV 1	39,8 HRC
2	0.150	364 HV 1	37,1 HRC	23	3.300	355 HV 1	36,1 HRC
3	0.300	369 HV 1	37,7 HRC	24	3.450	371 HV 1	37,9 HRC
4	0.450	344 HV 1	34,9 HRC	25	3.600	483 HV 1	47,9 HRC
5	0.600	357 HV 1	36,3 HRC	26	3.750	389 HV 1	39,7 HRC
6	0.750	352 HV 1	35,8 HRC	27	3.900	489 HV 1	48,4 HRC
7	0.900	375 HV 1	38,3 HRC	28	4.050	326 HV 1	32,9 HRC
8	1.050	388 HV 1	39,6 HRC	29	4.200	438 HV 1	44,3 HRC
9	1.200	417 HV 1	42,5 HRC	30	4.350	353 HV 1	35,9 HRC
10	1.350	373 HV 1	38,1 HRC	31	4.500	337 HV 1	34,1 HRC
11	1.500	393 HV 1	40,1 HRC	32	4.650	345 HV 1	35,0 HRC
12	1.650	401 HV 1	40,9 HRC	33	4.800	387 HV 1	39,5 HRC
13	1.800	404 HV 1	41,2 HRC	34	4.950	303 HV 1	30,1 HRC
14	1.950	489 HV 1	48,4 HRC	35	5.100	288 HV 1	28,3 HRC
15	2.100	426 HV 1	43,3 HRC	36	5.250	276 HV 1	26,6 HRC
16	2.250	420 HV 1	42,7 HRC	37	5.400	287 HV 1	28,1 HRC
17	2.400	449 HV 1	45,3 HRC	38	5.550	285 HV 1	27,9 HRC
18	2.550	417 HV 1	42,5 HRC	39	5.700	267 HV 1	25,2 HRC
19	2.700	383 HV 1	39,1 HRC	40	5.850	260 HV 1	24,0 HRC
20	2.850	490 HV 1	48,4 HRC				
21	3.000	448 HV 1	45,2 HRC				

Approved(Name,Date,Signature):
Schválil(iméno.datum.podpis):